

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN)

Band 22

© EFZN 2014

Das EFZN ist eine wissenschaftliche
Einrichtung der



TU Clausthal

in Kooperation mit den Universitäten



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN



Leibniz
Universität
Hannover



OLDENBURG



Forschung zum Thema Energiespeicher und –systeme in Niedersachsen

Kompetenzen und Potenziale

Ein Beitrag des Niedersächsischen Arbeitskreises "Forschungskonzept Energiespeicher und -systeme"

Goslar, 16.10.2014

Koordination:

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
Am Stollen 19A
38640 Goslar
Telefon: +49 5321 3816 8000
Telefax: +49 5321 3816 8009
<http://www.efzn.de>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1.Aufl. Göttingen : Cuvillier, 2014

978-3-95404-824-3

© Cuvillier Verlag, Göttingen 2014
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1.Auflage, 2014

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort der Herausgeber

Der vorliegende Bericht wurde von den Mitgliedern des Arbeitskreises „Forschungskonzept Energiespeicher und -systeme“ zusammengefasst, der auf der letzten Sitzung des Kompetenzknoten Harz der mittlerweile ausgelaufenen Landesinitiative Brennstoffzellen und Elektromobilität Niedersachsen am 1. Februar 2012 im EFZN in Goslar initiiert wurde. Die Mitglieder des AK sind nachfolgend aufgeführt:

Name	Organisation	Verantwortlich für
Dipl.-Ing. Katrin Beyer	EFZN (Goslar)	Koordination, Erstellung des Gesamtkonzepts
Prof. Leonhard Ganzer	Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (TU Clausthal)	Untergroundspeicher
Dr. Ernst-August Wehrmann	Institut für Elektrische Energietechnik (TU Clausthal)	Energiesysteme
Prof. Martin Könemund	Fakultät Elektrotechnik (Ostfalia Wolfenbüttel)	Netze
Prof. Ulrike Krewer	Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (TU Braunschweig)	Elektrische & elektro-chemische Speicher und Wandler
Dr. Andreas Lindermeir	CUTEC Institut (Clausthal-Zellerfeld)	Stoffliche Speichersysteme, Erstellung des Gesamtkonzepts
Dr. Alexander Dyck	NEXT ENERGY, EWE Forschungszentrum für Energietechnologie e.V. (Oldenburg)	Brennstoffzellen, Batteriespeicher und Netzkopplung
Prof. Axel Mertens	Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (LU Hannover)	Leistungselektronik
Prof. Harald Richter	Institut für Informatik (TU Clausthal)	Informations- und Kommunikationssysteme
Prof. Reinhard Leithner	Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (<i>ehem. Institut für Wärme und Brennstofftechnik</i> , TU Braunschweig)	Kraftwerke, Physikalische/ Mechanische Speicher

Die Mitglieder des AK danken allen niedersächsischen Wissenschaftlern, die sich am hier vorliegenden Beitrag beteiligt haben für Ihre Mitwirkung und produktive Diskussionen. Besonderer Dank gebührt den folgenden Wissenschaftlern, die aktiv die einzelnen Themengebiete mitverfasst haben:

Elektrische und elektrochemische Speicher

Prof. Heinz Wenzl (TU Clausthal)

Brennstoffzellen

Prof. Thomas Turek, Prof. Ulrich Kunz, Dipl.-Chem. Nadia Aoun (TU Clausthal)

Dr.-Ing. Andreas Lindermeir (CUTEC Institut)

Kraftwerke

Prof. Roland Scharf (LU Hannover)

Elektrolyse

Prof. Richard Hanke-Rauschenbach (LU Hannover), Prof. Thomas Turek (TU Clausthal)

Schwungmassenspeicher

Prof. Wolf-Rüdiger Canders (TU Braunschweig), Dr.-Ing. Ralf Bengel (TU Clausthal)

Informations- und Kommunikationstechnik

Prof. Jürgen Appelrath (Offis – Institut für Informatik, Oldenburg), Prof. Michael Sonnenschein, (NEXT ENERGY EWE Forschungszentrum für Energietechnologie e. V., Oldenburg), Prof. Michael H. Breitner, Prof. Hans-Jörg von Mettenheim (LU Hannover), Dipl.-Inf. Serge Runge (RFZN)

Elektrische Netze

Prof. Ekkehard Boggasch (Ostfalia) Prof. Lutz Hofmann (LU Hannover), Prof. Michael Kurrat, Prof. Bernd Engel, M.Sc. Fridolin Muuß (TU Braunschweig)

Gasnetze

Prof. Joachim Müller-Kirchenbauer, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Steven Hotopp, Dipl.-Ing. Holger Derlien (TU Clausthal)

Wärme- und Kältenetze

Dipl.-Ing. Werner Siemers, (CUTEC Institut)

Untergroundspeicher, Porenspeicher

Dr.-Ing. Viktor Reitenbach (TU Clausthal)

Untergroundspeicher, Kavernen

PD Dr.-Ing. Uwe Düsterloh (TU Clausthal)

Untertägige Pumpspeicher

Dipl.-Wirtsch. Christoph Neumann, Dipl.-Ing. Friederike Kaiser (EFZN), Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch (TU Clausthal)

Leistungselektronik

Dipl.-Ing. Lennart Baruschka (LU Hannover)

Wirtschaftswissenschaften

Prof. Michael H. Breitner, Prof. Hans-Jörg von Mettenheim (LU Hannover), Prof. Jutta Geldermann, Dr. Lars-Peter Lauven (Georg-August Universität Göttingen), Prof. Wolfgang Pfau, Dipl. Wirtschaftsing. Sebastian van Cayzeele (TU Clausthal)

Rechtswissenschaften

Prof. Dr. iur. Hartmut Weyer, Ass.jur. Franziska Lietz, LL.M. (TU Clausthal)

Sozialwissenschaftliche Energieforschung

Dr. Rüdiger Mautz (Georg-August Universität Göttingen)

Inhaltsübersicht

Vorwort der Herausgeber	7
1 Zusammenfassung.....	11
2 Motivation	12
3 Ziel	15
4 Bedeutung von Energiespeicherung für Niedersachsen	17
5 Elektrische und elektrochemische Speicher	20
5.1 Batterien	20
5.2 Elektrische Energiespeicher ohne chemische Reaktion	27
6 Energiewandler	28
6.1 Brennstoffzellen.....	28
6.2 Elektrolyse	33
6.3 Kraftwerke	35
7 Untergrundspeicher	40
7.1 Wasserstoffspeicherung in Kavernen und Porenspeichern	40
7.2 Druckluftspeicherung in Kavernen und Porenspeichern	45
8 Stoffliche Speichersysteme	48
9 Physikalische/Mechanische Speicher	54
9.1 Pumpspeicherwerke	54
9.2 Druckluftspeicherkraftwerke	59
9.3 Wärmespeicher.....	63
9.4 Schwungmassenspeicher	65
10 Netze	68
10.1 Elektrische Netze	68
10.2 Wärme- und Kältenetze	72
10.3 Gasinfrastruktur.....	75
11 Informations- und Kommunikationstechnik IKT	79
12 Leistungselektronik.....	88
13 Energiewirtschaft.....	91
14 Energierecht.....	95
15 Sozialwissenschaftliche Energieforschung	98
Anhang	105

1 Zusammenfassung

Die niedersächsischen Universitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover, Oldenburg, die Hochschule für angewandte Wissenschaften Ostfalia, sowie die An-Institute Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC Institut) und NEXT ENERGY - EWE Forschungszentrum für Energietechnologie e. V. haben es sich zur Aufgabe gemacht, einen Bericht zu den niedersächsischen Forschungsaktivitäten und –potenzialen im Bereich Energiespeicher und -systeme zu verfassen, um sowohl der niedersächsischen Politik, als auch der niedersächsischen und bundesweiten Industrie ein Profil der hiesigen Forschungslandschaft an die Hand zu geben.

Niedersachsen mit seinen geologischen und geographischen Besonderheiten hat im Vergleich zu den übrigen Bundesländern große Chancen, wesentliche Teile seiner Energieversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen. Naheliegende Aufgaben sind der Ausbau des Stromnetzes sowie die Erhöhung der Speicherkapazität für elektrische Energie.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die relevanten Technologien und die derzeitigen Kompetenzen an den genannten wissenschaftlichen Institutionen. Er ist eine Darstellung der Thematik aus der Sicht der Herausgeber und Coautoren und stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden jeweils die Bedeutung, die Herausforderungen und die Chancen des Einsatzes der verschiedenen Energiespeicher und der daraus resultierende Modifikationsbedarf für das Energiesystem beschrieben. Darüber hinaus werden die Innovations- und Technologiepotenziale, sowie der mögliche Forschungstransfer in die Industrie aufgezeigt und potentielle bzw. erforderliche zukünftige Forschungsaktivitäten innerhalb Niedersachsens identifiziert.

Um dem inter- und transdisziplinären Charakter der Problemstellung gerecht zu werden, werden neben den technischen Betrachtungen auch die Forschungsfelder der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie die Aspekte der Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften diskutiert.

2 Motivation

Energiespeicher sind eine wichtige Option zur Stabilisierung und Optimierung unseres Energiesystems. Sie ermöglichen die zeitliche Verschiebung zwischen Erzeugung und Verbrauch und können Erzeugungsanlagen von Verbrauchsschwankungen entkoppeln. Eingebettet in ein intelligent verschaltetes Energiesystem können sie eine qualitativ hochwertige, zuverlässige Versorgung bei stark schwankender Erzeugung sicherstellen. Die Situation von Speichern für elektrische Energie unterscheidet sich dabei deutlich von Speichern in Wärme- und Gasnetzen, die ebenfalls ein integraler Bestandteil der jeweiligen Netze sind.

Speicher für elektrische Energie stehen im Spannungsfeld zum Netzausbau, mit dessen Hilfe auch große Energiemengen räumlich (auch europaweit) zwischen Erzeugungsschwerpunkten und Verbrauchsschwerpunkten transportiert werden können. Der räumliche Ausgleich setzt voraus, dass im Netz Abnehmer zeitgleich für gerade lokal anfallende regenerative Energie oder Erzeuger für einen gerade benötigten lokalen Bedarf zur Verfügung stehen. Das Stromnetz kann somit als großer Handelsplatz gesehen werden, vorausgesetzt, ausreichende Transportkapazitäten stehen zur Verfügung. Durch die Liberalisierung wurde bereits das Prinzip aufgegeben, große Kraftwerke immer nahe an großen Verbrauchstandorten zu bauen. Der Stromhandel hat die Erzeugung durch das kostengünstigste Kraftwerk und nicht das Kraftwerk am günstigsten Standort im Netz gefördert, und somit tendenziell bereits zu einer Erhöhung der Transportmengen im Netz geführt. Mit zunehmendem Anteil regenerativer Energie im Verbundnetz steigen die für den örtlichen Ausgleich notwendigen Transportmengen weiter, weil die günstigsten Erzeugungsstandorte (z. B. Offshore Windparks) und die Verbrauchsschwerpunkte bisher weit voneinander entfernt sind. Speicher für elektrische Energie sind aber nicht in der Lage, den Ausbau der Transportnetze völlig zu vermeiden, weil Energiespeicher in der Nähe von Verbrauchsschwerpunkten zur Überbrückung von langen Zeiträumen sehr geringer Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen vorwiegend im Norden Deutschlands zu finden sind. Sie können an dieser Stelle dafür Sorge tragen, dass übermäßig hohe und selten auftretende Überkapazitäten der regenerativen Energien nicht ins Netz eingespeist werden müssen. Somit können sie zur Optimierung und Wirtschaftlichkeit der elektrischen Netze beitragen. Lediglich eine stoffliche Speicherung von Strom und der anschließende Transport über das bestehende Erdgasnetz oder aber ein neu aufzubauendes Wasserstoffnetz sind Optionen in derartigen Zeiten.

Szenarien für eine weitgehend vollständige Stromversorgung aus erneuerbaren Energiequellen zeigen, dass es neben langen Phasen mit einer hohen Überschussproduktion auch Phasen geben wird, in denen für Wochen bedingt

durch großräumige, auch ganz Europa betreffende Wetterlagen, einen Mangel an regenerativ erzeugtem Strom geben wird. Für eine unter allen Umständen zuverlässige Stromversorgung ist deshalb weiterhin eine Erzeugungsstruktur notwendig, die eine vollständige Energieversorgung durch konventionelle fossile Energieträger (Erdgas, Kohle usw.) oder durch aus Überschussstrom produzierte Energieträger (Wasserstoff bzw. synthetisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffoxiden) sicherstellen kann.

Zur flexibleren Anpassung an die Nachfrage im Strommarkt und Optimierung der Betriebsweise des zukünftigen Kraftwerkparks sind Energiespeicher eine sinnvolle Ergänzung zur wirtschaftlichen Gewährleistung der Versorgungssicherheit.

Für die Energiespeicherforschung ergeben sich einzelne Themenfelder aus der Klassifizierung der Energiespeicher für zukünftige Anwendungen. Geht man von der langfristigen Vision einer zu mehr als 80 % regenerativ gestützten Energieversorgung aus (post 2050), so wird deutlich, dass sich ein sehr hoher Bedarf an Energiespeichern entwickeln wird, wobei sich dieser Bedarf mit den wenigen vorhandenen und noch realisierbaren Großspeichern (Pumpspeicher und große Druckluftspeicher) heute nicht abdecken lässt. Vielmehr wird man jede sich bietende Möglichkeit und Technologie zur Realisierung großer, mittlerer und kleiner Speicher nutzen müssen, wobei mit abnehmender Speichergröße die Speicher immer dezentraler und damit näher an den regenerativen Erzeugern oder an den Verbrauchern positioniert werden könnten.

Unabhängig von den Bemühungen der Grundlagenforschung, neuartige zyklensichere und kostengünstige Speicherprinzipien zu finden, sieht die niedersächsische Forschung zurzeit drei Kategorien von Speichern, wobei in jeder Kategorie Forschungsbedarf besteht.

- **Kurzzeitspeicher** für die transiente Stabilität des Versorgungsnetzes bei plötzlich auftretenden Schwankungen (Sekundenreserve). In diese Kategorie fallen hoch überlastbare Schwungmassenspeicher, Doppelschichtkondensatoren und Batteriespeicher (z. B. Li-Ionen-Batterien). Ggfs. ist eine Kombination mit Umrichter-basierten Anlagen wie z. B. Phasenschiebern oder Stabilisatoren erforderlich, um die erforderliche Kurzschlussleistung und andere Netzparameter zu gewährleisten.
- **Mittelfristige Speicher** zur Reduzierung von Leistungsgradienten im Netz (15 min und Stundenreserve bis zu mehreren Stunden). Mit diesen Speichern können Leistungsgradienten so eingestellt werden, dass z. B. thermische Kraftwerke mit ihren systembedingten großen Zeitkonstanten dem Energiebedarf folgen können. Hier sind die überwiegende Zahl von elektrochemischen Speichern, sowie die Druckluft und Pumpspeichieranlagen einzuordnen.

- **Langzeitspeicher** zur Überbrückung wetterbedingter Ausfälle der regenerativen Erzeuger (Tage bis Wochen). Das kritische großräumige Wetter-Szenario ist z. B. die Situation „14 Tage Windstille bei bedecktem Himmel“. Dies tritt in Deutschland etwa zweimal pro Jahr mit unterschiedlich starker Ausprägung auf. Die hier benötigten Energiemengen sind so groß, dass sie nur durch stoffliche Speicherung von Überschussstrom und einen entsprechenden Kraftwerkspark (Residuallastkraftwerke) abgedeckt werden können. Die stoffliche Speicherung wird dabei als Wasserstoff und/oder als Methan bzw. weitere synthetische, auch flüssige Kohlenwasserstoffe erfolgen.

Neben der Betrachtung von Energiespeichern als Option zur Optimierung des gesamten Energiesystems sind aber auch technische und wirtschaftliche Alternativen zu beachten. Diese Alternativen sind ebenfalls wichtige Bestandteile des hier vorgelegten Dokumentes. Im Kern handelt es sich hier um folgende Optionen:

- Durch eine zeitliche Verschiebung der Nachfrage innerhalb der Stromsparte oder gar durch Verlagerung der Nachfrage von der Stromsparte in eine alternative Sparte wie zum Beispiel die Gassparte kann die momentane Verbrauchsleistung an die momentane Erzeugungsleistung angepasst werden (Demand-Side-Management). Derartige Maßnahmen können zentral koordiniert sowie dezentral selbst organisiert auf Basis von Kommunikationsstrukturen oder lokal auf Basis der Netzspannung und -frequenz entschieden werden.
- Die Kopplung des Stromnetzes mit lokalen Wärmenetzen inkl. des Wärmenetzes von Einfamilienhäusern erlaubt es, Strom thermisch zu nutzen statt ihn zu speichern. Auch hier kann der Verbrauch sehr schnell verändert werden und dem Energieangebot angepasst werden. Zur Kopplung des Stromnetzes zählt auch die Kraft-Wärme-Kopplung, insbesondere unter Verwendung von Brennstoffzellen, die einen Teil des auch langfristig erforderlichen Erzeugungsparks ausmachen können.
- Flexibilisierung des Netzes im Verteilnetzbereich, mit der eine weitere Durchdringung der Nieder- und Mittelspannungsnetze mit Photovoltaik und Windkraftanlagen auch ohne Rückgriff auf Speicher erreicht werden kann.

Aus dieser Zusammenstellung wird deutlich, dass Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Elektrotechnik, Chemie, Werkstoffphysik, Informations- und Kommunikationstechnik, Leistungselektronik und Wirtschaftswissenschaften unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen erfolgreich sein kann. Zur Bearbeitung sind Konsortien zwischen Forschungsinstituten und Industriepartnern besonders geeignet.

3 Ziel

Die niedersächsische Landesregierung hat zum 1. Juni 2012 die Landesinitiative Energiespeicher und -systeme eingerichtet um die Entwicklung energieeffizienter und wirtschaftlicher Speichertechnologien voranzutreiben. Dadurch sollen eine Stärkung des Technologiestandortes Niedersachsen im nationalen und internationalen Wettbewerb sowie die Intensivierung der Zusammenarbeit von Wirtschaftsunternehmen und Forschungseinrichtungen erreicht werden, wobei ein besonderes Augenmerk auf kleine und mittelständische Unternehmen sowie die Umsetzung von Ideen in marktfähige Produkte bzw. Dienstleistungen liegt. Neben Speichertechnologien (z. B. Batterien, Brennstoffzellen oder Redox-Flow-Systeme) für die Kurzzeitspeicherung sollen zusätzlich Themenstellungen in den Bereichen Großspeicher (Power-to-Gas, Druckluft/Dampf usw.) für die Speicherung großer Energiemengen und Energiemanagement (Wasserstoff, Kraft-Wärme-Kopplung, Netzanbindung, Smart Grid, Wärmepumpen usw.) vorangetrieben werden.

Verbunden mit der Etablierung der Landesinitiative war die Einrichtung eines wissenschaftlichen Satelliten, der die Arbeiten der niedersächsischen Wissenschaftler und Forschungseinrichtungen koordinieren und vernetzen soll, um Projekte zu initialisieren, Partner aus der heimischen Industrie zu finden und so einen Mehrwert im Vergleich zu den bisherigen Einzelaktivitäten zu generieren. Daraus ergibt sich die Sicherung bestehender und Schaffung neuer Beschäftigung in Niedersachsen durch den Transfer der Forschungsergebnisse in Produkte für die regionale Industrie. Der wissenschaftliche Satellit ist am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) beheimatet und soll in engem Kontakt mit der Geschäftsstelle der Landesinitiative die wissenschaftliche Ausrichtung aktiv gestalten.

Der vorliegende Bericht hat das Ziel, mittels eines Überblicks über die derzeitigen Herausforderungen und die derzeitigen Kompetenzen an den niedersächsischen wissenschaftlichen Institutionen die Schaffung wissenschaftlicher Exzellenz auf dem Gebiet der Energiespeicher und -systeme zu katalysieren. Dies kann am besten durch die Fokussierung auf Schwerpunkte, in denen bereits Kompetenz vorhanden ist und den Aufbau weiterer Kompetenz, insbesondere in Themengebieten, die für das Land Niedersachsen zukünftig von hoher Priorität sein werden, erreicht werden. Die Schaffung dieser Exzellenz sollte gerade im Bereich der Energieforschung durch eine enge Kooperation der Forschungsinstitute untereinander und auf Basis gemeinsamer Forschungsprojekte erfolgen.

Das vorliegende Dokument beschreibt die thematischen Schwerpunkte, die seitens der niedersächsischen Wissenschaftler im Bereich der Energiespeicher/-systeme gesehen werden, gibt einen Überblick über die bereits vorhandenen Kompetenzen und liefert Ansatzpunkte für F&E-Projekte sowie deren Innovations- und Technologiepotenziale und Forschungstransfer. Darüber hinaus wird der erforderliche Ausbau der Infrastruktur zur Verwirklichung der angestrebten Forschungsarbeiten beschrieben.

Da Niedersachsen durch seine geographische Lage (Windkraft, Biomasse, Erdgasvorkommen und Salzstöcke für Kavernenspeicher) einen großen Anteil an der

3 Ziel

zukünftigen Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland haben wird, hat Niedersachsen aus Sicht der niedersächsischen Wissenschaft das Potenzial zum wichtigsten „Energieland“ Deutschlands zu avancieren. Die wissenschaftlichen Interessen der Forschungsinstitute Niedersachsens stehen somit im Einklang mit den Landesinteressen und den Interessen zahlreicher, in Niedersachsen ansässiger Unternehmen und bieten somit eine gute Basis zur Umsetzung des Konzepts.

Das vorliegende Konzept soll den politischen Entscheidungsträgern einen Überblick über die aus Sicht der niedersächsischen Wissenschaft bedeutsamen Schwerpunkte geben und die Einordnung geplanter Aktivitäten in ein umfassendes Gesamtkonzept zum Thema Energiespeicher und -systeme ermöglichen. Den niedersächsischen wissenschaftlichen Einrichtungen dient das Konzept als Basis für die oben genannte thematische Zusammenarbeit, die in gemeinsamen, aufeinander abgestimmten Projektanträgen mit einer Laufzeit von mehreren Jahren münden wird. Der niedersächsischen Industrie, aber auch Unternehmen außerhalb Niedersachsens soll dieser Bericht aufzeigen, welche Schwerpunkte verfolgt werden und mit welchen Aktivitäten zu rechnen sein wird.

4 Bedeutung von Energiespeichern für Niedersachsen

Niedersachsen mit seinen geologischen und geographischen Besonderheiten hat im Vergleich zu den übrigen Bundesländern große Chancen, wesentliche Teile seiner Energieversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen. Insbesondere die Kombination aus erhöhter Stromerzeugung durch Offshore-Windenergieanlagen und den geologischen Voraussetzungen zur erzeugungsnahen Untergrundspeicherung von z. B. Wasserstoff in Kavernen oder Porenspeichern bietet ein Potenzial, mit dem Niedersachsen eine Vorreiterrolle im Bereich erneuerbarer Energiesysteme in Europa und der Welt einnehmen kann. Darüber hinaus ist Niedersachsen eine der bedeutendsten Agrarregionen und besitzt eine große landwirtschaftliche Kraft, die auch schon jetzt zur regenerativen grundlastfähigen Energieerzeugung einen Beitrag leistet. Dieser Anteil kann in Zukunft durch Verwertung von landwirtschaftlichen Sekundärrohstoffen weiter gesteigert werden. Der bereits erreichte Status und die vorhandenen Potenziale bieten vielversprechende Ansatzpunkte für eine weitere Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien und einem hohen, auch wirtschaftlich interessanten Export von Energie in andere Bundesländer, sowie in die angrenzenden Länder der Europäischen Union.

Niedersachsen verfügt außerdem mit zahlreichen Produktionsstandorten für Batterien und deren Ausgangsmaterialien, sowie der Volkswagen AG als einem der weltweit größten Hersteller von Fahrzeugen über erhebliche Potenziale, die Elektromobilität auf Basis erneuerbarer Energien und damit Emissionsminderungen im Verkehrsbereich voranzubringen und davon zu profitieren.

Neben dem weiteren Ausbau der Erzeugungskapazität erneuerbarer Energien ist es nicht nur erforderlich, die Anpassungsfähigkeit bzw. Flexibilität des Energiesystems zu erhöhen, sondern auch die Systemeffizienz und die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Die zunehmenden Schwankungen auf der Erzeugerseite, sowie die zunehmende Installation von regenerativen Energieerzeugern in strukturarmen bzw. bevölkerungs- und industriearmen Gebieten wie beispielsweise Windenergieanlagen Offshore und in Küstengebieten, sind nicht nur mit dem zeitlichen Verlauf der Nachfrage in Einklang zu bringen, sondern die Energie ist auch an den Ort des Verbrauchs zu transportieren.

Naheliegende Aufgaben sind daher der Ausbau des Stromnetzes sowie die Erhöhung der Speicherkapazität für elektrische Energie, um zum einen die Produktion bei Überkapazitäten nicht reduzieren bzw. „abregeln“ zu müssen und zum anderen, um die Systemstabilität weiterhin garantieren zu können.

In einem Szenario mit vorwiegend fluktuierender Stromerzeugung und dem Rückgang grundlastfähiger Komponenten ist darüber hinaus die deutliche Zunahme zeitlicher Preisschwankungen (insbesondere zeitweilig negative Strompreise) zu erwarten. Auch hier können Speichersysteme als Instrument zur Erbringung von Systemdienstleistungen wie z. B. der Bereitstellung positiver wie auch negativer Primär- und Sekundärregelleistung sowie Minutenreserveleistung, vor allem unter Nutzung von elektrischer Energie zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden.

4 Bedeutung von Energiespeichern für Niedersachsen

Als Kurzzeitspeicher können zentral bereits vorhandene oder noch weiter zu entwickelnde Pump- und Druckluftspeicherkraftwerke sowie dezentral elektrische und elektrochemische Speicher eingesetzt werden. Aufgrund der Begrenzungen hinsichtlich Be- und Entladezeit bzw. Speicherkapazität ist darüber hinaus eine Umwandlung von Überschusskapazitäten in stoffliche/chemische Energiespeicher erforderlich, die als Langzeitspeicher bezeichnet werden. Diese Speicher können sowohl zentral als auch dezentral zum Einsatz kommen. Als Anlagenaggregat ist hier die Wasserelektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff im Einsatz. Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft könnte einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Energieversorgung beitragen. Zusätzlich wird die Basis für den Einsatz von Brennstoffzellen im Mobilitätsbereich geschaffen, deren Technologieentwicklung vom Land Niedersachsen von 2004 bis 2012 in einer eigenen Landesinitiative (Brennstoffzelle und Elektromobilität) vorangetrieben wurde.

Darüber hinaus kann der Wasserstoff einer weiteren stofflichen Nutzung bzw. Veredelung zugeführt werden, wenn eine Kohlenstoffquelle wie z. B. das Kohlendioxid einer Biogasanlage oder auch kohlenoxidhaltige Industrieabgase, zur Verfügung steht. Mit den Prozessen der Methanisierung oder der Fischer-Tropsch Synthese können dann gasförmige (SNG, synthetic natural gas) oder flüssige (Kraftstoffe oder Chemiegrundstoffe) Energieträger erzeugt werden.

Weiter entlastend können Konzepte zur Anpassung von Verbrauchern an die Produktionskapazität wirken, z. B. indem es gelingt, Fahrzeugbatterien einer zukünftigen weit verbreiteten Elektromobilität in der Masse betrachtet intelligent, d. h. vor allem bei "Energieüberschuss" zu laden. Auch im Bereich des Demand-Side-Managements bilden intelligente Ansteuerungen die Grundlage dieser Technologie. Hier ist die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) als Querschnittsdisziplin von besonderer Bedeutung. Als weiteres übergreifendes Themenfeld ist die Wirtschaftlichkeit, der Rechtsrahmen sowie die gesellschaftliche Akzeptanz der technischen Lösungsvorschläge zu betrachten, um neben der technisch besten Lösung auch die wirtschaftlich attraktivsten und rechtlich und gesellschaftlich möglichen Ansätze zu ermitteln und so die niedersächsische Industrie zu unterstützen und die Umsetzung der Maßnahmen zu ermöglichen bzw. zu beschleunigen.

In der Summe sind die in Teilen bereits etablierten Energiepfade Niedersachsens zu einer regenerativen Energiestruktur für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Versorgung von Industrie, Haushalten und Mobilität zu verknüpfen. Dazu erforderlich ist auch die Einbeziehung der elektrischen Netze, der Leistungselektronik und der Gasnetze, um die einzelnen Technologie-Bausteine zu verknüpfen und eine möglichst hohe Gesamteffizienz des zukünftigen Energieversorgungssystems sicher zu stellen.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Speichersystems mit den Komponenten:

- Energiewandler zur Umformung der elektrischen Energie in die Energieform, die zur Speicherung verwendet wird. Die Rückumformung der gespeicherten Energie in elektrische Energie wird nicht immer mit dem gleichen Aggregat realisiert.

4 Bedeutung von Energiespeichern für Niedersachsen

- Energiespeicher mit stofflichen, physikalischen oder chemischen Speichermedien.
- Netzanschluss mit der Kopplung an das Versorgungsnetz.

Je nach Speichermedium sind Hilfsaggregate erforderlich. Sekundärtechniken mit Mess-, Steuer-, und Regelungstechnik unterstützen bei der Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich der Dynamik und des Anlagenschutzes. Ein übergeordnetes Managementsystem mit moderner Kommunikation ermöglicht die Einbindung in einen Kraftwerkspark.

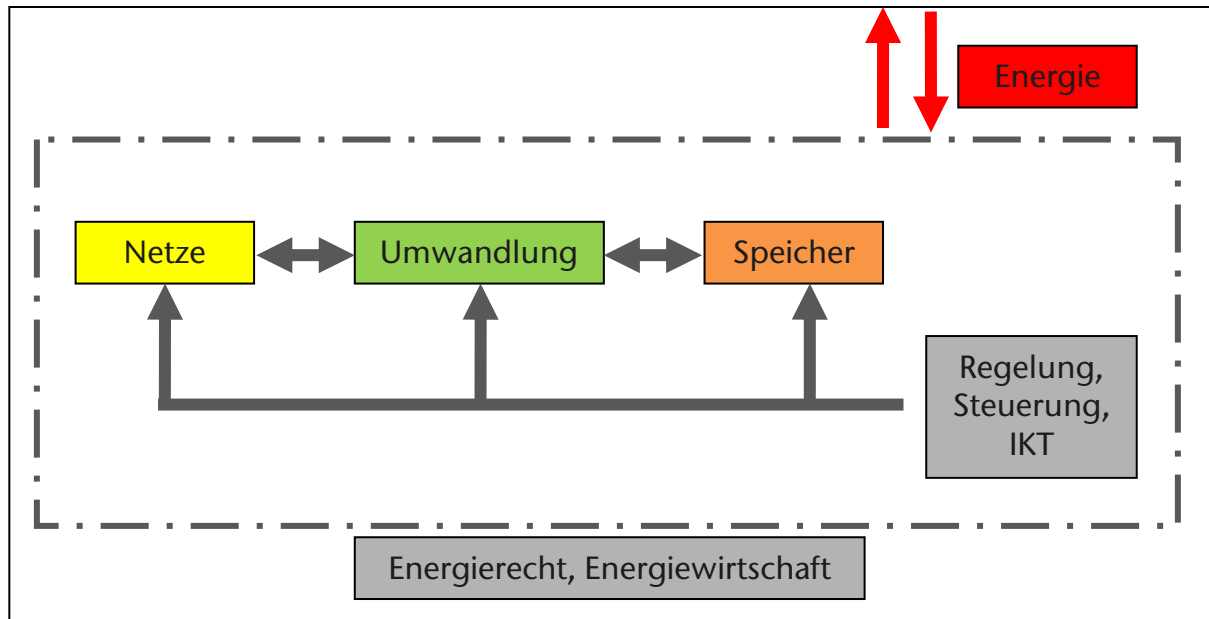


Abbildung 1: Energiespeichersystem

Für die Strukturierung der hier vorliegenden Betrachtungen wird eine Einteilung der Speicher entsprechend ihrer Speicherkapazität vorgenommen. Für jeden Technologiebereich, der einen Forschungsschwerpunkt darstellt, werden nach einer kurzen Einführung die bereits im Land Niedersachsen vorhandenen Vorarbeiten und Kompetenzen sowie der Forschungsbedarf, die Technologie- und Innovationspotenziale und der Forschungstransfer aufgezeigt. Die Querschnittstechnologien Leistungselektronik, IKT, Wirtschaft und Recht schließen die Analyse.

5 Elektrische und elektrochemische Speicher

5.1 Batterien

5.1.1 Einleitung

Batterien werden je nach Anwendung als dynamische mittelfristige Speicher (unterbrechungsfreie Stromversorgung, netzferne Applikation, Elektromobilität) und Kurzzeitspeicher (Netzstabilisierung im Sekundenbereich) eingesetzt und weisen eine ausgezeichnete dynamische Belastbarkeit bei mittleren Energiedichten auf. Als Zwischenspeicher für regenerative Energien sind wiederaufladbare Sekundärzellen einsetzbar. Neben der Anwendung in der Elektromobilität eignen sich größere Batteriesysteme, z. B. auch Redox-Flow-Systeme, als stationäre, dezentrale Energiespeicher. Der Großteil derzeitiger Sekundärbatterien weist dabei sowohl exzellente Wandlungswirkungsgrade als auch geringe Kapazitätsverluste während der Lagerung auf. Die Speicherung großer Mengen an Elektrizität ist prinzipiell möglich, derzeit jedoch noch mit hohen Kosten verbunden.

Neben weit verbreiteten und kommerzialisierten Technologien wie Lithium(Li)-Ionen- oder Blei-Säure-Batterien gibt es Spezialbatterien für verschiedenste Anwendungen, u. a. Hochtemperaturbatterien, Batterien mit flüssigen oder gasförmigen Reaktanden, darunter auch atmende Batterien, die Luftsauerstoff verzehren. Batterien, bei denen die Energie in einer Flüssigkeit gespeichert wird, sind der Klasse der Flussbatterien zuzuordnen; dazu gehören die Redox-Flow-Batterien. Im Gegensatz zu klassischen Batteriesystemen bieten sie den Vorteil der Trennung von Energieinhalt im Flüssigkeitstank und Leistung im Zellstack. Somit sind beide Größen unabhängig voneinander skalierbar und können auf beliebige Anwendungen abgestimmt werden. Es gibt bereits vereinzelt kommerzialisierte Redox-Flow-Systeme (z. B. Vanadium-Redox-Flow-Batterie). Allen voran im asiatischen Markt werden im zunehmenden Maße Systeme mit Leistungen und Energien im Bereich Megawatt und Megawattstunden angeboten und realisiert. Luft-atmende Sekundärzellen, d. h. sekundäre Batterien mit Luftsauerstoff (Lithium-Luft-Batterie, Zink-Luft-Batterie) sind derzeit noch nicht marktreif, als Primärbatterien jedoch bereits kommerziell erhältlich. Die Attraktivität Luftbasierter Systeme liegt in der im Vergleich zu Li-Ionen-Batterien deutlich höheren Energiedichte und niedrigem Materialeinsatz. Niedrige Materialkosten und geringer Sicherheitsaufwand kommen bei Zink-Luftsauerstoffbatterien hinzu.

Generell ist die Entwicklung im Batteriesektor sehr dynamisch und ein Einstieg in die Forschung und Entwicklung von neuen Technologien sowie von prinzipiell bereits auf anderen Skalenordnungen etablierten Technologien (Li-Ionen Batterien) derzeit attraktiv. Kurzfristig ist aufgrund der derzeit höheren Technologiereife der Li-Ionen-Batterien von einer Dominanz dieser Technologie auszugehen. Prinzipielle Aussagen über die Eignung verschiedener derzeit in Forschung und Entwicklung befindlicher Batteriekonzepte können bereits jetzt unter Berücksichtigung der breit gefächerten Anwendungsanforderungen (mobil/stationär, kurzzeitig/mittelfristig, Leistung/Energie) getroffen werden. Eine zuverlässige Einschätzung, welche der

Technologien sich mittel- und langfristig etablieren werden, kann jedoch derzeit nicht gegeben werden. Auch die Automobilindustrie setzt hier auf mehrere Technologien. Entsprechend sind sowohl Investitionen in theoretische Grundlagenforschung als auch in anwendungs- und entwicklungsorientierte Forschung, insbesondere im Gebiet Li-Ionen-Batterie notwendig, um die zukünftige Batterieforschung und -entwicklung erfolgreich (weiter) voranzutreiben. Obwohl die internationale und nationale Sichtbarkeit anderer deutscher Forschungsstandorte im Bereich Batterie (z. B. Ulm, München, Aachen) derzeit noch stärker ausgeprägt ist als die niedersächsische Forschungslandschaft, ist Letztere stark im Wachsen begriffen und weist nun umfangreiche akademische und industrielle Kompetenzen und Aktivitäten in Grundlagenforschung und anwendungsnaher Forschung, sowie im Transfer zwischen diesen beiden auf.

5.1.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Niedersachsen wandelt sich auch Dank der zielgerichteten Förderung durch das Land zu einem der führenden deutschen Standorte der Batterietechnik. Dies ist u. a. ersichtlich an der großen Anzahl der an Batterien arbeitenden universitären Arbeitsgruppen (> 20), zwei neu gegründeten Batterieforschungszentren (Battery LabFactory Braunschweig BLB des NFF, Batterietestzentrum des EFZN), sowie der Inbetriebnahme einer industriellen Batteriesystemproduktion (Bsp. Volkswagen AG). Im Gebiet der Forschung auf Systemebene präsent sind auch die Fachhochschulen des Landes (z. B. Fakultät für Versorgungstechnik, Ostfalia sowie Fakultät für Naturwissenschaften, HAWK). Neben den Universitäten und Fachhochschulen beschäftigen sich anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen wie NEXT ENERGY und IFAM in Oldenburg sowie die PTB in Braunschweig mit elektrochemischen Energiespeichern.

In Niedersachsen befinden sich schließlich mehrere international operierende Unternehmen mit eigenen Forschungsaktivitäten für Materialien, Batterieproduktion sowie Betrieb, wie z. B. Bertrandt, Chemetall, Electrocycling EWE, Grillo, H.C. Starck, Honeywell, I+ME Actia, IAV, Johnson Controls, Recylex, Solvay und Volkswagen, die Produkte und Dienstleistungen weltweit und teilweise auch als Weltmarktführer vertreiben.

Der Schwerpunkt der niedersächsischen Aktivitäten in der Batterieforschung liegt auf Li-Ionen- und Zink-Luft-Sekundärbatterien. Weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Niedersachsen liegen in Batterie-Technologien mit InnovationsPotenzial wie Redox-Flow-Batterien (TU Clausthal, TU Braunschweig, EFZN, NEXT ENERGY, Ostfalia) und Li-Luft-Batterien (Univ. Oldenburg, IFAM).

Batterieforscher der fünf Universitäten in Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg sowie aus den Forschungseinrichtungen EFZN, IFAM, NEXT ENERGY und NFF haben in 2012 die „Forschungsallianz Batterie & Energiespeicher Norddeutschland“ (kurz FABENO) gegründet, die Ressourcen und Kenntnisse hochschul- und zentrumsübergreifend bündeln und durch koordinierte Forschungsaktivitäten eine starke Position in Deutschland und Europa erlangen soll.

Bundesweit nahezu einzigartig ist der enge Schulterschluss zwischen Naturwissenschaft, insbesondere Elektrochemie, und Ingenieurwissenschaften.

Li-Ionen-Batterien werden an allen Hochschulen des Landes untersucht. In den letzten Jahren konnten mehrere Verbundprojekte eingeworben werden: Neben einem signifikanten Anteil an Material-orientierter Grundlagenforschung (Schwerpunktprogramm SPP 1473, DFG-Forschergruppe Molife, Graduiertenkolleg GEENI) hat sich ein Schwerpunkt in angewandter Forschung zur Batterieproduktion und Systemintegration herausgebildet. Beispielhafte Förderprojekte sind die Battery Lab Factory Braunschweig, das Batterietestzentrum, das BMBF-Projekt Schaufenster Elektromobilität mit Beteiligung von zehn akademischen Partnern im Bereich Batterie und den BMU-Projekten Lithorec und green2store, an dem sich niedersächsische Firmen, u. a. Chemetall, H.C. Starck und Volkswagen, beteiligen.

Mit zehn bzw. sieben Lehrstühlen sowie jeweils einem angegliederten Batteriezentrum pro Universität prägen insbesondere die TU Braunschweig und die TU Clausthal die Li-Ionen-Batterie-Forschungsaktivitäten Niedersachsens. Umfangreiche Forschungstätigkeiten an der TUBS zeigen die Institute für Partikeltechnik (Batterieproduktion, Materialien), Ökologische und Nachhaltige Chemie (elektrochemische Charakterisierung), Energie und Systemverfahrenstechnik (Modellierung, elektrochemische Charakterisierung), Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elektrische Charakterisierung, Modellierung), Füge- und Schweißtechnik (Batterieproduktion) und Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (Batterieproduktionstechnik). Fokus ist dabei die Analyse und Produktion von Batterien auf Zellebene. An der TUC sind die Institute für Elektrische Energietechnik (Batteriesysteme), Elektrochemie (neue Elektrolyte) und Chemische Verfahrenstechnik (Modellierung) hervorzuheben. Einen Fokus auf der Analyse von mikroskopischen Prozessen an Elektroden und im Elektrolyt haben an der LUH die Institute für Physikalische Chemie und Elektrochemie (Transportprozesse) und für Anorganische Chemie (Materialien), an der Univ. Göttingen das Institut für Materialphysik (Elektrodencharakterisierung) sowie an der Univ. Oldenburg das Institut Chemie (Oberflächenprozesse) zu nennen. Weiterhin von der Material- bis zur Systemebene stark vertreten sind die der Universität Oldenburg nahestehenden Zentren NEXT ENERGY (Schwerpunkte liegen auf dem Pfad von der Elektrochemie bis zur Systemintegration) und das IFAM.

Ähnlich der akademischen Forschung hat die niedersächsische industrielle Forschungslandschaft einen Schwerpunkt ihrer Aktivitäten in Materialien für Li-Ionen-Batterien (Solvay, H.C. Starck, Chemetall) sowie in der Systemproduktion und -integration für automobiler Anwendungen (Volkswagen, IAV, Johnson Controls). Diese Synergien im Forschungsfeld bilden exzellente Möglichkeiten zu gemeinsamer Forschung mit wirtschaftlichem Potenzial. Das Gebiet Zellproduktion wird auf der industriellen Seite in Niedersachsen zur Zeit nicht vor Ort abgedeckt – Volkswagen baut eine Pilotfertigung in einem Joint-Venture mit Varta in Ellwangen auf und Johnson Controls fertigt die Zellen derzeit in den USA. Bei entsprechendem Bedarf, insbesondere in der Automobilindustrie, ist durchaus auch mit dem Aufbau einer Zellproduktion in Niedersachsen zu rechnen. Beim Recycling von Li-Ionen-Batterien ist Niedersachsen auf dem besten Weg, in Industrie wie auch in der Wissenschaft die führende Rolle in Deutschland einzunehmen. So soll im Rahmen des vom BMU

geförderten Leuchtturmprojekt „Lithorec II“, das von Chemetall und der TU Braunschweig geleitet sowie von weiteren niedersächsischen Unternehmen wie Electrocycling, I+ME actia, Solvay, H. C. Starck und Volkswagen getragen wird, im Harz eine die gesamte Prozesskette umfassende Pilotanlage zum Batterierecycling errichtet werden.

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellt das Vanadium-Redox-Flow-System dar. Projekte mit intensiver Unterstützung von Industrieunternehmen werden am EFZN, an der TUC (Institut für Chemische Verfahrenstechnik), der TUBS (Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie) und bei NEXT ENERGY bearbeitet. Industriepartner sind u. a. ThyssenKrupp, Bayer, Grillo und Eisenhuth. Forschungsschwerpunkte bilden neben Materialuntersuchungen (neue Kohlenstoffmaterialien, poröse Elektroden) vor allem das Scale-up auf industrielle Systemgrößen und der optimale Betrieb von Vanadium-Redox-Flow-Systemen unter verfahrenstechnischen und elektrotechnischen Gesichtspunkten.

Im Bereich Zink-Luft-Sekundärbatterien hat die TUC, insbesondere das Institut für Chemische Verfahrenstechnik sowie das Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (TUBS) eine langjährige Expertise. In jüngster Zeit hat sich hieraus ein starker niedersächsischer Forschungsschwerpunkt herausgebildet. Beteiligt sind sieben forschende universitäre Institute (zusätzlich zum ICVT und InES die Institute für Elektrochemie und für Elektrische Energietechnik (TUC), das Institut für Partikeltechnik (TUBS) sowie das Institut für Chemie (Oldenburg)), mehrere Forschungseinrichtungen (Fraunhofer-Institut IFAM, EFZN, Heinrich-Hertz-Institut) und eine Fachhochschule (Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, FH Hannover). Der Großteil dieser Einrichtungen erforscht zusammen mit lokalen industriellen Partnern im Verbundforschungsprojekt Akuzil neue Ansätze zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Zyklenfestigkeit. Die TUC ist darüber hinaus an einem weiteren Projekt (ZinkPlus) beteiligt, in dem verschiedene Industrie- und Hochschulpartner eine sekundäre Zink-Luft-Batterie entwickeln wollen. Die Forschung an Zink-Luft-Batterien ist derzeit noch grundlagenorientiert und stellt eine gut erweiterbare Basis für angewandte Forschung dar. Ein systematischer Ausbau um weitere Partner mit komplementären Kompetenzen birgt ähnlich der Forschungsaktivitäten an Li-Ionen-Batterien ein großes Potenzial des erfolgreichen Transfers von Wissen und Technologie in die Industrie.

Die industrielle Forschung konzentriert sich derzeit auf Materialproduzenten wie den Zinkpulver-Hersteller Grillo. Da Aufbau und Morphologie der Zinkelektrode entscheidend für die Leistungsfähigkeit dieser Zellen ist, birgt die Zusammenarbeit zwischen akademischen Einrichtungen und Industrie hervorragende synergistische Effekte. Daneben ist auch Solvay aktiv bei der Entwicklung von Additiven für Elektrolyte von Zink-Luft-Systemen.

5.1.3 Forschungsbedarf

Damit Batterien als verlässliche, preiswerte und leistungsstarke Speicher für stationäre und mobile Anwendungen einsetzbar sind, ist signifikante Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig. Diese reicht von der grundlagenorientierten

Forschung, insbesondere für mittelfristig einsetzbare, derzeit noch nicht kommerzialisierte Batterietechnologien bis zur angewandten Forschung und Entwicklung von Li-Ionen-Batterien und ihren Systemen.

Li-Ionen-Batterien besitzen bereits jetzt attraktive Energiedichten und eine ausreichende Dynamik für die Elektromobilität. Für eine erfolgreiche Marktdurchdringung müssen jedoch Kosten und Sicherheitsrisiken gesenkt und Lebensdauer und Energiedichte weiter gesteigert werden. Forschungsbedarf ergibt sich entsprechend hinsichtlich verbesserter Materialien, einer optimierten Auslegung, Gestaltung, Fertigung und Charakterisierung der Elektroden und Zellen sowie bezüglich robusten Systemdesigns. In allen diesen Punkten weist Niedersachsen heute u. a. aufgrund der hohen Anzahl in der Batterietechnik aktiver Institute und der konsequenten Unterstützung durch das Land Niedersachsen Kompetenzen auf. Wichtige Grundlagen für eine gezielte, d. h. Verständnis-basierte Optimierung der genannten Punkte legt u. a. das Mitte 2012 gestartete Graduiertenkolleg GEENI. Die durch das Projekt erzielte Stärkung und Vernetzung der niedersächsischen natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlagenforschung im Batteriebereich ist u. a. eine optimale Basis für koordinierte durch Bund oder DFG geförderte High-Impact-Forschungsprojekte, die in einer möglichen zweiten Phase des Graduiertenkollegs formuliert werden sollten.

Die parallel zum Graduiertenkolleg ebenfalls gestarteten anwendungsnäheren Zentren auf Zellebene (BLB) sowie Systemebene (NEXT ENERGY, Batterietestzentrum) bauen derzeit die Infrastruktur auf und werden diese in den nächsten Jahren intensiv nutzen, Kenntnisse aus den Grundlagenuntersuchungen einbringen und die Vernetzung mit industriellen Partnern konsequent ausbauen. Die Kompetenzen von Forschungseinrichtungen wie dem BLB ermöglichen dabei einen Forschungstransfer von in der niedersächsischen Industrie bisher wenig etablierten Batterieproduktionstechnologien. Für die nachhaltige Nutzung dieser Infrastrukturmaßnahmen und eine deutschlandweite Behauptung ist eine Kontinuität in der Förderung in den nächsten Jahren, u. a. durch kleinere Verbundprojekte und mittels technischen Personals essentiell. Die Verbesserung der Materialeigenschaften und Produktionsprozesse, von der Herstellung neuer Materialien über die Aufbereitung der Materialien für die Elektrodenfertigung bis hin zu korrosionsfesten Schweißverbindungen und elektrolytdichten Durchführungen wird kontinuierlich weitergehen und insbesondere ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen betreffen. Forschungsbedarf gibt es bei der Sicherheit, z. B. durch Einsatz nicht brennbarer Elektrolyte wie ionischer Flüssigkeiten. Bei derzeitigen Elektrolyten ist nicht zu erwarten, dass das inhärente Brandrisiko vollständig vermieden werden kann, so dass in der Unterdrückung der Risiken ebenfalls ein hoher Forschungsbedarf liegt. Auch sind Betriebsführung und Zustandsbestimmung hinsichtlich Wirkungsgrad und Lebensdauer zu optimieren.

Die Steigerung der Energiedichte von Li-Ionen-Batterien wird selbst bei Einsatz neuer Materialien und fortschreitender Optimierung der Li-Ionen-Batterien begrenzt sein. Die Forschung sollte daher zusätzlich auf alternative Batteriesysteme mit höheren theoretischen Energiedichten zielen. Hier ist insbesondere die gesamte Breite der material- und ingenieurwissenschaftlichen Forschung gefordert, bevor erste

praxistaugliche Zellen mit hohen Leistungs- und Energiedichten sowie einer hohen Zyklenstabilität hergestellt werden können.

Als potentielle Next-Generation-Batterien gelten aufgrund hoher Energiedichten und damit hoher Reichweiten für die Elektromobilität insbesondere Zink-Luft- sowie Li-Luft-Zellen, aber auch Li-Schwefel-Batterien. Dringender Forschungsbedarf besteht in der Verbesserung der Zyklenstabilität, Leistungsdichte und Effizienz. Die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen hierfür sind erheblich und erfordern die konsequente Bündelung wichtiger Kompetenzen aus Wissenschaft und Wirtschaft. Niedersachsen weist im Gebiet der Metall-Luft-Batterien, insbesondere auch Zink-Luft-Batterien mit einer hohen Anzahl universitärer und industrieller Partner (siehe oben) eine deutschlandweit und international herausragende Kompetenz auf, deren weitere Bündelung zu einem Forschungsschwerpunkt signifikante Fortschritte in der Technologie bewirken sollte und damit gute Möglichkeiten zur erfolgreichen Marktablierung bietet. Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung wären dabei die Entwicklung von zyklenstabilen Elektroden mit niedrigen Überspannungen, die Bereitstellung alternativer Elektrolyte sowie die optimale Komposition dieser auf Zellebene.

In den letzten Jahren wurden in Niedersachsen weiterhin Forschungsaktivitäten zu Redox-Flow-Batterien aufgebaut, die aufgrund ihres hervorragenden Wirkungsgrades für die Zwischenspeicherung regenerativer Energien attraktiv sind. Gerade im Hinblick auf die hohe Aktualität der Speicherung fluktuierender regenerativer Energien sollte die auf dieser Technologie vorhandene Kompetenz im Grundlagenforschungsbereich und in anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung ausgebaut werden. Im Grundlagenforschungsbereich stehen neue Redox-Flow-Batterietypen mit höheren Energiedichten, robustere bzw. preiswertere Materialien sowie grundsätzliche Analysen zu den für verschiedene Skalen optimalen Systemkonfiguration im Vordergrund. In der anwendungsorientierten Forschung steht die im Schulterschluss mit der Industrie geführte Optimierung der Komponenten und ihrer Verschaltung sowie der Betriebsweise von Vanadium-Systemen hinsichtlich Energieverluste im Vordergrund.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die wissenschaftlichen Hochschulen und Forschungseinrichtungen des Landes im Bereich der Batterietechnik bereits jetzt eng zusammen arbeiten. Durch den Aufbau des Batteriefertigungslabors in Braunschweig und des Batterietestzentrums in Goslar, sowie durch das Projekt Akuzil, das Graduiertenkolleg GEENI und die bereits bewilligten Projekte aus dem Schaufenster Elektromobilität, bzw. Projekte, die sich dafür in der Bewilligungsphase befinden, ist Niedersachsen gut für die zukünftige Forschung und Entwicklung im Batteriebereich positioniert.

5.1.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Die ähnliche Aufstellung von niedersächsischen Hochschulen und Industrie im Gebiet Li-Ionen-Batterie birgt große Synergieeffekte und kann bei intensiver Zusammenarbeit zu einem entscheidenden Technologievorsprung gegenüber Wettbewerbern führen. Eine Zusammenarbeit insbesondere mit der

Automobilindustrie wird explizit von der Wissenschaftlichen Kommission Niedersachsen (WKN) empfohlen und bereits, unter anderem am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF), verfolgt. Auch die starke produktionsorientierte Forschung am BLB bietet eine einmalige Gelegenheit der systematischen, wissenschaftlich fundierten Batterieentwicklung.

Ein weiteres großes Potenzial ist durch die derzeit beginnende Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) gegeben: Batterien sind geschlossene, komplexe Systeme, so dass der Batteriezustandsbestimmung sowohl für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit als auch der Sicherheit eine herausragende Rolle zukommt. Das Zusammenbringen der Kompetenzen der Universitäten im Gebiet Batterien mit denen der PTB im Bereich standardisierte Messung birgt große Synergieeffekte für beide Partner.

Die technologische Realisierung von elektrisch wiederaufladbaren Metall-Luft-Systemen erfordert eine enge Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Elektrochemie, Materialwissenschaften und Fertigungstechnologie. Hier existiert in Niedersachsen bereits eine sehr gute Forschungslandschaft. Ein erstrebenswertes Ziel wäre, diese Kapazitäten zur Umsetzung der vollständigen Wertschöpfungskette bei der Entwicklung und Fertigung neuer effizienter Technologien von elektrochemischen Energiespeichern zu bündeln.

Der geringe Preis von Zink-Luft-Batterien bei gleichzeitig hohen Energiedichten macht diese Zellen attraktiv für die Elektromobilität und damit für die lokale Automobilindustrie. Zur Nutzung des Technologievorsprungs für eine erfolgreiche Marktplatzierung sollte eine möglichst frühe und intensive gemeinsame Forschung und Entwicklung zwischen Hochschulen und Industrie angestrebt werden.

Weiterhin sind Elektroden, an denen Sauerstoff verbraucht bzw. erzeugt wird, eine wichtige Querschnittstechnologie. Grundsätzliche Fragestellungen sind für Elektrolyseure und Metall-Luft-Batterie gleich. Ferner ist zu warten, dass verbesserte Membranen und Katalysatoren auch für die chemische Industrie in zahlreichen Prozessen von Interesse sind.

Batteriesensorik zur Erfassung von Strömen, Materialkonzentrationen und lokalen Temperaturen sind für die Entwicklung wichtig in fertigen Produkten aber auch zur gezielten Überwachung des Systems an bestimmten, ausgewählten Stellen.

5.1.5 Forschungstransfer

Die Entwicklungen und dazugehörigen Kompetenzen in Niedersachsen decken die vollständige Wertschöpfungskette ab, beginnend von der Materialsynthese über die Materialverarbeitung bis hin zur Fertigung und dem Systembau. Hierzu sind unterschiedliche Firmen in Niedersachsen aktiv. Die Umsetzung von grundlagenorientierte Entwicklungen in die technologische Nutzbarkeit für die Industrie steht in besonderem Fokus verschiedener Zentren, wie dem BLB, dem Batterietestzentrum, dem Fraunhofer-Institut IFAM und NEXT ENERGY. Die akademischen Partner arbeiten in bilateralen Projekten mit unterschiedlichen Industriepartnern zusammen, und sind bestrebt, durch diese Forschungstransfers

die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und niedersächsischen Industrie zu stärken. Ansatzmöglichkeiten bestehen von der Materialentwicklung der einzelnen Komponenten, bis hin zur Systemintegration in stationäre und automobiler Anwendungen.

5.2 Elektrische Energiespeicher ohne chemische Reaktion

Die Speicherung von Energie und die damit verbundene Abgabe hoher Leistungsspitzen werden insbesondere bei der intensiven Nutzung dezentraler Energieversorgungsanlagen (regenerative Energien) an Bedeutung gewinnen. Zur Abdeckung von lokalen Leistungsspitzen kann der Einsatz effizienter Speichersysteme die Versorgungsqualität erheblich steigern. Elektrische Speicher, wie Kondensatoren, Doppelschichtkondensatoren und supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES), können zur Kurzzeitspeicherung von Elektrizität, z. B. in der Industrielektronik, eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch eine hohe dynamische Belastbarkeit aus. Elektrische Kondensatoren haben einen zu geringen Energieinhalt. Supraleitende Spulen (SMES) können typischerweise nur Zeitbereiche im Sekundenbereich abdecken, allerdings mit sehr hoher Leistung. Systeme im Bereich von ca. 1 MVA wurden für Mittelspannungsanwendungen bereits gebaut, scheinen sich aber nicht bewährt zu haben. Doppelschichtkondensatoren dagegen sind inzwischen kommerziell erhältliche Produkte für Anwendungen, in denen der Energieinhalt von Batterien und ihr Gewicht zu hoch sind. Ihr Einsatz in stationären Anwendungen als Energiespeicher wurde vorgeschlagen aber wegen der Konkurrenz von Batterien noch nicht kommerziell umgesetzt. Diese Produkte stellen keinen Forschungsschwerpunkt dar. Erwähnenswert ist, dass die Fa. Honeywell in Seelze Elektrolyte für Doppelschichtkondensatoren herstellt und einer der weltweit größten Lieferanten ist.

6 Energiewandler

6.1 Brennstoffzellen

6.1.1 Einleitung

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die für stationäre, portable sowie für mobile Anwendungen geeignet sind. Zu unterscheiden sind Hochtemperatur- (HT) und Niedertemperatursysteme (NT). HT-Brennstoffzellen wie Schmelzkarbonat- (MCFC) und Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) werden zwischen 600 und 1000 °C betrieben und können zur dezentralen Energiewandlung in Blockheizkraftwerken verwendet werden. Als Brennstoffe werden hier Wasserstoff oder Erdgas, bzw. nach entsprechender Aufbereitung auch andere Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Sauerstoff bzw. Luft werden als Oxidationsmittel verwendet. Die NT-Brennstoffzellen, in der Regel mit Polymerelektrolytmembranen ausgestattet (PEMFC), werden im Temperaturbereich bis 80 °C, im Spezialfall der HT-PEMFC auch bis 200 °C, betrieben. Als Reaktanden dienen hier Sauerstoff bzw. Luft und Wasserstoff (PEMFC, alkalische PEMFC) bzw. Methanol (DMFC, alkalische DMFC). Die stoffliche Umsetzung findet an geträgerten Edelmetall-Katalysatoren (Platin, Ruthenium) statt. Im Gegensatz zur PEMFC eignen sich DMFCs derzeit aufgrund ihrer geringen Leistungsdichte nicht für den elektromobilen, wohl aber für den portablen Einsatz. Sie werden auch als Modellsysteme zur Materialentwicklung aufgrund geringerer Sicherheitsaufwendungen verwendet. PEMFCs werden intensiv für den elektromobilen aber auch für den Hausenergie- und portablen oder netzfernen Einsatz diskutiert. Neben den klassischen NT-Brennstoffzellen gibt es weniger weitverbreitete Typen wie die HT-PEMFC, die aufgrund der erhöhten Betriebstemperatur geringere Anforderungen an die Wasserstoffreinheit stellen, sowie alkalische Membran-Brennstoffzellen, die mit edelmetallfreien Katalysatoren arbeiten können und damit eine signifikante Kostenreduktion versprechen. Schließlich erlauben Biobrennstoffzellen aufgrund ihrer Fähigkeit, kohlenstoffhaltige Moleküle in elektrische Energie und CO₂ zu wandeln, die Aufreinigung von Abwässern bei gleichzeitiger Bereitstellung von elektrischer Energie.

6.1.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Im Bereich der NT-Brennstoffzellen (DMFC und Wasserstoff-PEMFC) wird in Niedersachsen seit mehr als zwei Jahrzehnten Forschung betrieben. Auf diesem Gebiet aktive Forschungsinstitute sind das ICVT und IEE (TUC), das CUTEC Institut (Clausthal-Zellerfeld), das InES und das IÖNC (TUBS), das IfT (TUBS), das IFT und TFD (LUH), die Ostfalia (OS), die PTB (BS) und NEXT ENERGY (Oldenburg). Im Folgenden werden die bearbeiteten Themen und Forschungsschwerpunkte zusammengefasst:

Am Institut für Chemische Verfahrenstechnik (ICVT) stehen Arbeiten zur Entwicklung der DMFC im Vordergrund. Zu den bearbeiteten Themen gehören insbesondere die Elektrokatalysatoren und die Herstellung von Gasdiffusionselektroden und

Membranen-Elektroden- Einheiten. Im Bereich der Katalysatoren, die auf der Kathode für die Sauerstoffreduktion eingesetzt werden, wurden in den letzten Jahren verstärkt alternative Trägermaterialien wie bspw. Kohlenstoffnanoröhren oder Carbid-abgeleitete Kohlenstoffe anstelle von Ruß untersucht. Weiterhin wurden Systemkomponenten wie Dichtungen und Bipolarplatten entwickelt und optimiert. In einer aktuellen Arbeit werden die Langzeitstabilität sowie das Aktivierungsverhalten einer DMFC untersucht.

Das Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) der TU Clausthal beschäftigt sich mit Brennstoffzellen auf Systemebene. Beispielsweise werden Strominhomogenitäten in Brennstoffzellen gemessen und aus den Ergebnissen Lebensdauer-Prognosemodelle für Brennstoffzellen entwickelt. Auch werden Brennstoffzellendaten aus realen Anwendungen analysiert und vor allem mit Hilfe der Methoden der Betriebsfestigkeit für diese Systeme Lebensdauerabschätzungen vorgenommen. Im Bereich der SOFC beschäftigt sich das Institut mit dem Gesamtsystemaufbau und der Analyse verschiedene Schaltungsvarianten. Der Schwerpunkt der Arbeit in diesen Projekten liegt im Bereich der Steuerung und Automatisierung. Weiterhin ist es Aufgabe des Instituts, das gesamte System zu simulieren und als „Hardware in the loop“ zu betreiben. Anhand von Spezifikationen, die sich aus der Systemarchitektur ergeben, werden im Sinne einer optimalen Energiekonditionierung auch Komponenten wie beispielsweise Spannungswandler entwickelt. Am Rande wird auch ein eher chemischer Ansatz verfolgt, bei dem es um Zusammensetzungen neuartiger Ionenaustauschermembranen geht, die auf Zellebene im Miniaturmaßstab untersucht werden.

Das Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (InES) der TU Braunschweig analysiert und optimiert verschiedene Brennstoffzellen und ihre Systeme, wobei die modellgestützte Analyse und Optimierung verschiedener Systemkonfigurationen im Vordergrund steht. Auf Zellebene werden die physikalisch-chemischen Prozesse sowohl von DMFCs und PEMFCs als auch von neuen Technologien wie alkalischen DMFCs und Bio-Brennstoffzellen analysiert und quantifiziert. Neben der gezielten modellgestützten Optimierung zur Leistungs- und Robustheitssteigerung werden elektrochemische Sensormethoden zur Online-Zustandsbestimmung entwickelt. Beispielhafte Projekte sind die Energieversorgung für netzferne Kleinverbraucher mit DMFCs, die Verfahrensentwicklung zur Methanol-konzentrationsbestimmung in Zellen, die Zustandsbestimmung mittels Messmethoden sowie die Analyse und Optimierung autarker und tragbarer DMFC-Systeme mittels Modellierung und experimenteller Validierung. In einem niedersächsischen Forschungsverbund wurde unter Federführung des CUTEC Instituts ein autarkes, thermisch hoch integriertes SOFC-System kleiner Leistung auf Propanbasis entwickelt, dabei stand insbesondere das Konzept der Anodenabgas-Rückführung für propanbetriebene SOFC-Systeme im Fokus.

Das CUTEC Institut in Clausthal-Zellerfeld beschäftigt sich im Bereich der Brennstoffzellentechnologie schwerpunktmäßig mit der Systementwicklung für SOFC. Mittels verfahrenstechnischer Fließbildsimulationen werden unterschiedliche Systemkonfigurationen bewertet und mit realen Messdaten abgeglichen. Detailaspekte wie optimierte Strömungsführung in Kombination mit Wärme- und Reaktionstechnik werden mit entsprechenden Simulationsprogrammen ergänzend

abgebildet. Zur Bereitstellung der notwendigen Eingangsdaten für die Systemauslegung werden SOFC Stacks, Katalysatoren für die Brenngaserzeugung und die weiteren erforderlichen Systemkomponenten (z. B. Gasreinigung, Reformierung, Komponenten für Anodenabgasrezirkulation, Wärmetauscher usw.) charakterisiert und unter Systemgesichtspunkten bewertet. Schwerpunkte der aktuellen Arbeiten liegen im Bereich der hocheffizienten Verstromung von Biogas, der Entwicklung von SOFC-Systemen mit Anodenabgasrückführung sowie der Funktionsmusterentwicklung für SOFC-Systeme im Leistungsbereich 0,1 bis 10 kW_e.

In den letzten Jahren hat sich das CUTEC Institut zu einem auch international gefragten Partner für SOFC-Projekte entwickelt, wie sich an der Beteiligung an zwei im Rahmen des FP7 von der EU geförderten Projekten (SAPIENS, NELLHI) zeigt.

NEXT ENERGY in Oldenburg entwickelt Materialien für Brennstoffzellen mit dem Fokus auf alkalischen Brennstoffzellen und Mitteltemperatur-Systemen. Schwerpunkte sind die Entwicklung von Membranen und Katalysatoren für neuartige Membran-Elektroden-Einheiten. Durch Evaluierung von Kostensenkungspotenzialen auf Basis preiswerter Materialien sollen geringere Systemkosten ermöglicht werden. Weiterhin finden Arbeiten zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten und Systemen statt, die dem Verständnis von Degradation und Langlebigkeit von Brennstoffzellen dienen. Schließlich wird die Mikro-Kraft Wärme Kopplung zur Evaluierung von verfügbaren KWK Systemen in einem marktnahen Umfeld und die Netzanbindung zur Effizienzsteigerung in der Bereitstellung von Strom und Wärme untersucht.

Am Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC) der TU Braunschweig werden schwerpunktmäßig mikrobielle Brennstoffzellen und verwandte mikrobielle bioelektrochemische Systeme untersucht und entwickelt. Das Spektrum der Arbeiten reicht dabei von fundamentalen Untersuchungen über zugrunde liegende Mechanismen über die Entwicklung neuer Anodenmaterialien sowie Kathodenkatalysatoren bis hin zur Entwicklung von Prototypen zum Einsatz in der Abwasserreinigung.

An der PTB in Braunschweig werden Arbeiten zur Gefährdungsbetrachtung von PEM Brennstoffzellen hinsichtlich des Einsatzes in explosionsgefährdeten Betriebsstätten durchgeführt. Am Institut für Thermodynamik der TU BS beschäftigt man sich mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung der Kühlung von Brennstoffzellen und arbeitet hier auch eng mit der Automobilindustrie zusammen. Am dortigen Institut für Füge- und Schweißtechnik wird unter anderem die Klebtechnik für Bipolarplatten untersucht. Am Institut für Chemie der Universität Oldenburg werden mit mikroelektrochemischen Methoden intermediäre Produkte der Sauerstoffreduktionsreaktion untersucht. Diese Verfahren werden außerdem genutzt, um im Hochdurchsatzverfahren mögliche Katalysatoren zu sichten. Ein weiteres Ziel besteht in Kooperation mit NEXT ENERGY im Auffinden von edelmetallfreien Katalysatoren für die Sauerstoffreduktion in alkalischen Medien. An der LUH beschäftigen sich ebenfalls verschiedene Institute mit der Brennstoffzellenforschung. Am Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik ist die Medienversorgung von Brennstoffzellensystemen eines der Forschungsgebiete. Hierzu gehören u. a. die Luftversorgung von Brennstoffzellensystemen im

Flugzeugbereich sowie die Integration einer Luftturbine in ein SOFC-System. Im Vordergrund stehen dabei dynamische Verdichter. Das dortige Institut für Thermodynamik beschäftigt sich mit der Analyse von Brennstoffzellensystemen. Hier sei beispielhaft die Modellierung von Brennstoffzellenhybridsystemen für Schifffahrtsanwendungen erwähnt. Schließlich ist auch das Institut für energieoptimierte Systeme der Ostfalia aktiv auf dem Gebiet der Integration verschiedener Energiespeicher und -wandler in Energiesysteme. Hierbei wird unter anderem eine Wasserstoff-Brennstoffzelle eingesetzt.

Darüber hinaus wird seit dem 1. September 2014 an der LUH im neu besetzten Fachgebiet elektrische Energiespeichersysteme am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik das dynamische Betriebsverhalten von PEM-Brennstoffzellen untersucht.

6.1.3 Forschungsbedarf

Anhand der aufgelisteten Vorarbeiten und Kompetenzen wird ersichtlich, dass die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Brennstoffzelle noch lange nicht abgeschlossen sind. Im Bereich der PEMFC/DMFC werden nachfolgend einige für die niedersächsische Forschungslandschaft attraktive Fragestellungen zusammengefasst:

- Aufklärung der Mechanismen und Ableitung von Maßnahmen zur Reduktion des Alterungsverhaltens von Brennstoffzellen,
- Reduktion der Edelmetallbeladung zur Kostensenkung,
- Entwicklung von kontinuierlichen Verfahren für die Katalysatorherstellung und die Beschichtung von Trägermaterialien und Membranen,
- Optimierung von Bipolarplatten und Dichtungen,
- Systembetrachtungen zur umfassenden Kostenoptimierung von Brennstoffzellen,
- Analyse und Optimierung des dynamischen Betriebsverhaltens.

Auch für die weitere Entwicklung der SOFC werden auf verschiedenen Gebieten gute Chancen gesehen, hierzu gehören beispielsweise:

- Entwicklung von beschleunigten Alterungstests, Aufklärung von Alterungsmechanismen und Minimierung der Zell- und Stack-Degradation,
- Entwicklung dauerstabiler Dichtungssysteme und schadstoffresistenter Elektroden,
- Verbesserung der Leistungsdichte und Ausweitung der Leistungsklasse $> 10 \text{ kW}_e$,
- Entwicklung hocheffizienter Systemkonzepte mit interner Wärmenutzung,
- Konzepte zum Recycling.

Mikrobielle Brennstoffzellen stellen schließlich einen hochattraktiven neuen Brennstoffzellentyp dar, dessen Entwicklung noch am Anfang steht. Im Vordergrund der Forschungsaktivitäten stehen hier:

- Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien (Anode und Kathode),

- Entwicklung effizienter Reaktorkonzepte zur Implementierung in der Abwasserbehandlung,
- Grundsatzuntersuchungen zum biologischen und elektrochemischen Verständnis der Bioelektrokatalyse.

6.1.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Die Verwendung von Brennstoffzellen als mobile und stationäre Energiewandler wird schon seit vielen Jahren forciert, deutliche Verbesserungen konnten hier bereits erreicht werden. Als mobiler Energiewandler wird die Wasserstoff-Brennstoffzelle im Vergleich zu Batterie-Systemen momentan wieder als attraktiv eingeschätzt, da deutlich längere Fahrzeug-Reichweiten erzielt werden und eine rasche Betankung bereits heute Stand der Technik ist. Die immer noch bestehende Problematik der Langzeitstabilität wird durch intelligente Systemdesigns zur Vermeidung kritischer Zustände und durch Einsatz stetig verbesserter Materialien zukünftig lösbar sein. Methanolbasierte Brennstoffzellen sind insbesondere aufgrund der hohen volumetrischen Energiedichte von Methanol nach wie vor sehr attraktiv für portable Anwendungen, konkurrieren aber bei diesen Anwendungen mit immer leistungsfähigeren Batterien.

SOFC-Systeme bieten sich vor allem für die stationäre Energieversorgung (BHKW, KWK), die Hausenergieversorgung (μ -KWK) sowie als effiziente Stromerzeuger für netzferne Anwendungen (z. B. Messstationen, Berghütten usw.) an. Auch im Freizeitbereich (Camping, Boote) werden große Potenziale für die zeitnahe Markteinführung gesehen. Da die verfügbaren State-of-the-art-Technologien in diesen Bereichen oftmals nur unzureichend geeignet sind die Anwenderbelange abzudecken, kann ein Markteintritt von SOFC Systemen in diesen frühen Märkten helfen, eine Fertigungs- und Infrastruktur auf- und auszubauen, Lieferketten zu etablieren und Felderfahrungen zu sammeln.

6.1.5 Forschungstransfer

Mit H.C. Starck ist in Goslar ein Unternehmen ansässig, das stark in der Material- und Zellentwicklung für SOFC-Stacks engagiert ist. Darüber hinaus finden sich mit Volkswagen, der Meyer Werft, der EWE und Enercity industrielle Akteure, die im Bereich Systementwicklung und -integration, Erprobung und Vermarktung aktiv sind. Auch außerhalb der Kerntechnologie hat sich in Niedersachsen in den letzten Jahren ein industrielles Umfeld etabliert, das in der Komponentenentwicklung (z. B. Bipolarplatten von Eisenhuth) oder der Fertigungstechnik (z. B. Wesselmann) Marktanteile besetzen konnte. Auch die Solvay AG arbeitet auf dem Gebiet der Materialien und Komponenten für Brennstoffzellen, die Planet GmbH auf dem Gebiet der Systeme und Dienstleistungen. Hier gilt es, die bereits bestehende Kooperation zwischen Industrie und Forschungslandschaft weiter auszubauen und neue Akteure aus der Industrie zu gewinnen.

6.2 Elektrolyse

6.2.1 Einleitung

Für die chemische/stoffliche Energiespeicherung stellt die Wasserelektrolyse zur Kompensation von Überschusskapazitäten und Kapazitätsdefiziten im Netz und somit zum Erhalt der Systemsicherheit ein zentrales Anlagenaggregat dar. In Zeiten geringer Last und hohem Angebot an regenerativ erzeugtem Strom kann durch Wandlung des elektrischen Stroms mittels Elektrolyse der chemische Energieträger Wasserstoff hergestellt werden. Wasserstoff kann als Rohstoff direkt weiterverarbeitet oder aber, abhängig von der erzeugten Menge, entweder tiefkalt verflüssigt, in (Nieder-/Hoch-) Druckbehältern oder in Unterspeichern, wie z. B. Salzkavernen gespeichert und danach bedarfsgerecht als Energieträger für unterschiedliche Anwendungen zur Verfügung gestellt werden.

Grundsätzlich können drei relevante Grundtechnologien der Elektrolyse genannt werden:

- die alkalische Elektrolyse mit einem flüssigen basischen Elektrolyt,
- die saure bzw. PEM-(Polymer-Elektrolyt-Membran) Elektrolyse mit einem polymeren Festelektrolyt und
- die Hochtemperaturelektrolyse mit einem Festoxid als Elektrolyt.

Bei der alkalischen Elektrolyse und bei der PEM-Elektrolyse muss außerdem zwischen atmosphärischer und Druckelektrolyse unterschieden werden.

6.2.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Niedersächsische Forschungseinrichtungen arbeiten bisher auf dem Gebiet der Wasserelektrolyse nicht im Bereich der Grundlagenforschung, sondern vielmehr im anwendungs- und systemorientierten Einsatz.

Am EFZN und an der Ostfalia werden Untersuchungen bzgl. des Einsatzes der Wasserelektrolyse zur zentralen und dezentralen Speicherung von Wasserstoff bzw. zur Herstellung von synthetischem Erdgas (SNG) durch Hydrierung von Kohlenstoffoxiden durchgeführt. Hierdurch kann die Elektrolyse zum Instrument zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen werden. Im Fokus steht dabei die Betrachtung der Betriebsweise der Elektrolyse in neuartigen Energieverbundsystemen, die sich durch die technische Vernetzung unterschiedlicher regenerativer Energien (Wind, Solar, Biomasse usw.) auszeichnen. Für diese Untersuchungen bindet das EFZN Einrichtungen wie das CUTEC Institut und andere niedersächsische Forschungseinrichtungen ein. Es wurden bisher noch keine Projekte innerhalb der niedersächsischen Universitäten in diesem Bereich gefördert.

Für die Entwicklung zukünftiger Forschungsaktivitäten gut nutzbare Vorarbeiten wurden auch am ICVT der TU Clausthal durchgeführt. Insbesondere die dort untersuchten neuen, energiesparenden Verfahren zur Elektrolyse von

Kochsalzlösungen (Chlor-Alkali-Elektrolyse) haben hinsichtlich der verwendeten Materialien und des Zelldesigns große Ähnlichkeit mit den Verhältnissen bei der alkalischen Wasserelektrolyse und können als Startpunkt für zukünftige Projekte genutzt werden.

Ferner wird seit dem 1. September 2014 an der LUH im neu besetzten Fachgebiet elektrische Energiespeichersysteme am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik die Wasserelektrolyse, insbesondere auf Basis von Membranelektrolyseuren betrachtet.

6.2.3 Forschungsbedarf

Der Einsatz der Wasserelektrolyse in neuartigen Energieverbundsystemen, sowie die Identifikation von möglichen Synergien mit bereits installierten Industrieanlagen bedürfen detaillierter Betrachtungen, um zukünftig technisch sowie auch wirtschaftlich sinnvolle Pfade beschreiten zu können.

Da die alkalische Elektrolyse derzeit im kontinuierlichen Betrieb bereits im großindustriellen Maßstab (dreistelliger MW-Bereich) und auch die PEM-Elektrolyse derzeit im dreistelligen kW-Bereich als Demonstrationsanlage, 2015 im ein- und 2018 im zweistelligen MW-Bereich gemäß Siemens zur Verfügung stehen soll, sind Demonstrationsprojekte der Energieverbundsysteme anzuraten. Sowohl während der Bau- und Inbetriebnahmephase, als auch während des Betriebes sind zahlreiche neue Forschungsfragestellungen zu erwarten.

Im Hinblick auf den zukünftig erforderlichen dynamischen Einsatz (Kaltstart, Teillastbereich) der Wasserelektrolyse, der beispielsweise technische Auswirkungen auf die Lebensdauer haben wird, sind grundlegende Untersuchungen erforderlich. Während Materialfragen (z. B. Katalysatoralterung, Durchlässigkeit von Separatoren) in Laboranlagen betrachtet werden können, sind für Erprobungen des Gesamtsystems auch Demonstrationsanlagen erforderlich.

Im Bereich der Grundlagenforschung sind zahlreiche zentrale Fragen der Weiterentwicklung der Elektrolyse hinsichtlich des Wirkungsgrades, der Lebensdauer, der Dynamik und der Kosten ungeklärt, die ein weites Betätigungsfeld für niedersächsische Forschungseinrichtungen bieten werden.

Trotz der momentan noch relativ geringen Erfahrung mit der Wasserelektrolyse ist diese Schlüsseltechnologie ein unverzichtbarer und alternativloser Baustein für die stoffliche Speicherung regenerativer Energie und somit ein wichtiger zukünftiger Forschungsschwerpunkt. Da verschiedene Vorarbeiten aus den Bereichen der Chlorelektrolyse und der Brennstoffzellenforschung genutzt werden können, wird erwartet, dass sich durch Vernetzung der potentiellen Beteiligten in Niedersachsen schnell die Möglichkeit zur Generierung von gemeinsamen Forschungsprojekten ergeben wird.

6.2.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Die Wasserelektrolyse wird voraussichtlich mit fortschreitendem Ausbau der erneuerbaren Energien als Instrument für Systemdienstleistungen zentrale Bedeutung gewinnen. Sie stellt als Energiewandler nicht nur das Bindeglied zwischen dem elektrischem Netz und dem Energiespeicher dar, sondern kann darüber hinaus negative Regelleistung im Sekundenbereich zur Verfügung stellen.

Darüber hinaus kann die Elektrolyse für zahlreiche industrielle Anwendungen, wie z. B. die Methanisierung, die Fischer-Tropsch-Synthese, aber auch für den mobilen Sektor (Brennstoffzelle) den Rohstoff Wasserstoff aus regenerativen Quellen liefern und somit zur "Dekarbonisierung" des Energiesystems beitragen. Um erfolgreich die aus regenerativ erzeugtem Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle für die Elektromobilität zur Marktreife zu führen, ist eine ausgereifte Elektrolysetechnik zwingend erforderlich.

6.2.5 Forschungstransfer

Es ist zu erwarten, dass der Einsatz der Wasserelektrolyse in neuartigen Energieverbundsystemen und die Nutzung von Synergieeffekten mit bereits etablierter Technik zu verfahrenstechnischen Systemen führen werden, die durch den fachübergreifenden Vernetzungscharakter effiziente, innovative Technologien hervorbringen wird. Unternehmen, die eine langjährige Expertise im Rahmen der Elektrolysetechnik aufweisen, die allerdings über Jahrzehnte aufgrund fehlender wirtschaftlicher Einsatzgebiete brachlag, können sich mit dieser Technologie auf dem Markt neu etablieren. Darüber hinaus bietet die Elektrolyse zahlreichen Unternehmen, die auf dem Gebiet der Elektrochemie arbeiten, wie z. B. Herstellern von Brennstoffzellen, ein weiteres Geschäftsfeld. Unternehmen, die derzeit im Bereich der Elektrolysetechnologie von der Forschung in diesem Feld profitieren bzw. den Wissenschaftlern zur Seite stehen könnten, wären z. B. Siemens, Hydrogenics, Solvay, NEL Hydrogen usw.

6.3 Kraftwerke

6.3.1 Einleitung

Thermische Kraftwerke und Verbrennungskraftanlagen, also Dampfkraftwerke bzw. Gasturbinen- und Motorenkraftwerke oder Kombinationen aus beiden (z. B. GuD-Kraftwerke) sind in Deutschland und vielen Teilen der Welt das Rückgrat der Stromversorgung. In Kraftwerken dieser Art wird der größte Teil des weltweit benötigten Stromes erzeugt. Außerdem liefern thermische Kraftwerke und Verbrennungskraftanlagen die zur Stabilisierung der Stromnetze benötigten Systemdienstleistungen.

In Deutschland und den Teilen der Welt in denen ebenfalls nennenswerte Anteile des Stromes aus erneuerbaren Energien hergestellt werden, kommt diesen

Kraftwerken zunehmend die Aufgabe zu, die Residualleistung, also die Differenz zwischen Stromleistungsbedarf und der vorrangig eingespeisten Leistung aus erneuerbaren Energien zu liefern. Das veränderte Anforderungsprofil wirft eine Reihe von Fragestellungen auf, die Ansatzpunkte für Forschungsprojekte geben.

Zur Umwandlung in elektrische Energie werden in thermische Kraftwerken und Verbrennungskraftanlagen heute meistens fossile Brennstoffe eingesetzt. Grundsätzlich eignen sich diese Kraftwerkstypen jedoch auch zur Umwandlung regenerativer Energien, regenerativ gewonnener Brennstoffe oder Kombinationen aus beiden. Bekannte Beispiele dafür sind Solarthermie-Kraftwerke, Biogas-Anlagen bzw. Biomasse-Kraftwerke. In einem Stromversorgungssystem mit dem Anspruch eines steigenden Anteils an erneuerbaren Energien stellt sich daher auch die Frage, wie bestehende und neu zu errichtende thermische Kraftwerke und Verbrennungskraftanlagen mit einem zunehmenden Anteil regenerativer Energien betrieben werden können.

In Deutschland und weiten Teilen Europas treten erfahrungsgemäß regelmäßig Wetterlagen auf, bei der die Stromproduktion aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen über mehrere Wochen keine oder nur geringfügige Beiträge liefern kann. Deshalb müssen dem Netz jederzeit mit hoher Verlässlichkeit zuschaltbare Stromerzeugungsanlagen bereitgestellt werden, die durch den Einsatz vorgehaltener Brennstoffe den Gesamtbedarf decken können. Die Aufgabe, diese gesicherte Leistung bereitzustellen, kommt im Wesentlichen ebenfalls den thermischen Kraftwerken und Verbrennungskraftanlagen zu.

Standorte mit thermischen Kraftwerken und/oder Verbrennungskraftanlagen eignen sich auch gut für Speichierzwecke mit verschiedenen Energieträgern. Überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien kann beispielsweise in Form von Wärme, Druckluft und/oder Brenngas gespeichert werden und bei Bedarf wieder in Strom umgewandelt werden.

Durch den Einspeisevorrang der Windenergie- und Photovoltaikanlagen ist es in Deutschland in den letzten Jahren immer häufiger dazu gekommen, dass fossil befeuerte Kraftwerke bei niedriger Last betrieben werden oder längere Zeit ganz abgestellt werden mussten. Dies hatte für die betroffenen Anlagen stark sinkende Produktionsmengen zur Folge. Darüber hinaus hat die Einspeisung von Strom nach dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) zu einem Preisverfall auf dem Strommarkt geführt, durch den viele Kraftwerke wegen fehlender Erlöse nicht mehr in der Lage sind, ihre Fixkosten zu decken. Für den Erhalt der Wirtschaftlichkeit thermischer Kraftwerke und Verbrennungskraftanlagen sind daher Maßnahmen erforderlich, die zu einer Reduzierung der Fixkosten führen. In einem künftigen Stromversorgungssystem wird sich die Rolle dieser Kraftwerke stark an den Anforderungen einer Stromversorgung mit steigendem Anteil der Erzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien orientieren.

Daraus lassen sich die Aufgaben für die Forschung in der Kraftwerkstechnik ableiten:

- Verbesserung der Einsatzflexibilität der thermischen Kraftwerke und Verbrennungskraftanlagen durch hohe Laständerungsgradienten, niedrige Mindestlast und kurze Anfahrzeiten
- Verbesserung der Fähigkeit zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen für die Stabilisierung des Versorgungsnetzes
- Untersuchung von Maßnahmen zur Absenkung der Fixkosten der Erzeugung
- Mitverbrennung oder Umstellung auf regenerative Brennstoffe.
- Speicherung von regenerativ erzeugtem, überschüssigem Strom durch Wärmespeicher und/oder Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff durch Wasser-Elektrolyse(Power-to-Gas-to-Power) und Einsatz dieser Wärme und/oder des Wasserstoffs oder in Methan umgewandelten Wasserstoffs in den bisherigen thermischen Kraftwerken.

6.3.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Am Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik InES (früher: Institut für Wärme- und Brennstofftechnik IWBT) der TU Braunschweig werden seit Jahrzehnten ähnliche Fragestellungen wie im vorigen Abschnitt beschrieben bearbeitet:

Für stationäre und dynamische Simulationen von Kraftwerkskreisläufen wurde ein Freilastrechner entwickelt, der schließlich von Siemens realisiert wurde, ferner das Programmsystem ENBIPRO – Energie-Bilanz-Programm, das unter anderem auch von Ingenieurbüros in Hannover und Braunschweig verwendet wird. Mit BAUBAP wurde ein Lebensdauerberechnungsprogramm entwickelt und im Kraftwerk West in Wolfsburg der VW-Kraftwerke AG installiert. Ferner wurde ein 3D-Finite-Volumen-CFD-Simulationsprogramm für Kraftwerksfeuerungen entwickelt, mit dem vom Institut zahlreiche Simulationen im Auftrag von Kraftwerksherstellern und Betreibern durchgeführt wurden bzw. werden mit Fragestellungen wie Wärmestromdichteverteilung in der Brennkammer, Ausbrand, CO-, SOx- und NOx-Emissionen, Mineralumwandlungen, Verschlackungen und Verschmutzungen und deren Verminderung usw. Zum Thema: „Flexibilisierung von fossil befeuerten Dampfkraftwerken“ ist derzeit gerade ein Auftrag von Alstom-Mannheim in Bearbeitung. Im Rahmen der EIRI - E.ON International Research Initiative hat das Institut 2008 einen Preis mit Forschungsgeldern für das Projekt ISACOAST-CC – ISobaric Adiabatic COmpressed Air Energy Storage – Combined Cycle gewonnen. Dieses Projekt verband Gas- und Dampfturbinen-Kombi-Anlagen, die mit über 60 % Stromerzeugungswirkungsgrad die Anlagen sind, die heute die höchsten Wirkungsgrade unter Wärmekraftwerken erreichen, mit Druckluft- und Hochtemperatur-Wärmespeichern.

In einem vom BMWi geförderten Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für keramische Komponenten im Maschinenbau der RWTH-Aachen (heute: Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau IWM) ein Hochtemperatur-Wärmeübertrager für ein Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk mit Kohlenstaubdruckfeuerung entworfen. Es wurde eine Testanlage gebaut und der Wärmeübergang und die Verschmutzung durch Kohlenasche bis 1200 °C getestet.

Auch am neu gegründeten Institut für Kraftwerkstechnik und Wärmeübertragung der Leibniz Universität Hannover werden seit April 2013 aktuelle Fragestellungen aus

der Kraftwerkstechnik bearbeitet. Für die Untersuchung von Fragestellungen zu Kraftwerkskreisläufen wird das kommerzielle Simulationsprogramm EBSILON eingesetzt. Das Programm wurde bisher für die Abbildung verschiedener thermischer Kraftwerke und Müllverbrennungsanlagen eingesetzt und dient der Validierung von Messdaten. Das Programm wird außerdem für Untersuchungen zum Einsatz von Blockheizkraftwerken und ORC-Kreisläufen eingesetzt.

6.3.3 Forschungsbedarf

Aus dem Abschnitt 6.3.1 lässt sich ein vielschichtiger Forschungs- und Förderungsbedarf erkennen bzw. ableiten:

- Flexibilisierung thermischer Kraftwerke: Sowohl auf der Wasser-Dampf-Seite als auch auf der Brennstoff-Rauchgas-Luft-Seite ergeben sich zahlreiche Fragestellungen, die mit den herkömmlichen und kommerziell verfügbaren Simulationstools nicht einfach oder gar nicht zu beantworten sind, wie z. B. dynamische Instabilitäten im Verdampfer oder instabile Verbrennungsverhältnisse, insbesondere bei kleinen Lasten, schnellere Starts, schnellere Laständerungen und Verwendung optimaler Regelungen und Steuerungen für diese Zwecke, den nächsten Start vorbereitendes Abstellen und Warmhalten usw.
- Die Grundlagen kommerzieller Simulationstools sind im Allgemeinen nicht zugänglich, sodass die Basis nicht wirklich bekannt und damit die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse zweifelhaft ist. Ferner sind kommerzielle Tools oft nicht benutzerfreundlich bzw. nur nach einer längeren Schulung zu bedienen, nur für bestimmte Zwecke bzw. Fragestellungen zugeschnitten und einsetzbar (z. B. unterschiedliche Programme für stationäre und dynamische Simulationen und für Auslegung und Validierung von Messergebnissen) und für Ingenieurbüros oft prohibitiv teuer. Somit ist eine Weiterentwicklung der Simulationstools der Institute, wie z. B. des Instituts für Energie- und Systemverfahrenstechnik oder auch kommerzieller Tools bezüglich neuer Fragestellungen und die Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit von großem Interesse sowohl für Betreiber als auch Ingenieurbüros.
- Im Themenfeld Elektrolyseure und Methanerzeugung (siehe 6.2) sind die direkte Verwendung von Wasserstoff und Sauerstoff zur Produktion von Heißdampf, die Verwendung von Wasserstoff als alleiniger Brennstoff oder vor allem Zusatzbrennstoff in Dampfkraftwerken (auch kohlegefeuerten), Gasturbinen und GuD-Anlagen, die Methanisierung des Wasserstoffs in einem Sabatier-Prozess (Nutzung der dabei anfallenden Wärme im Kraftwerksprozess) sowie die Nutzung von Wasserstoff und Methan in GuD Anlagen offene Fragestellungen. Untersuchungen bezüglich notwendiger Brenner- und/oder Brennerumbauten und der Auswirkungen auf die anderen Kraftwerkskomponenten sind erforderlich.
- Beim Einsatz von Niedertemperatur-Wärmespeichern (z. B. Heißwasserspeichern) bei der Speisewasservorwärmung oder Einsatz auch von Mittel- und Hochtemperatur-Wärmespeichern und Betrieb der thermischen

Kraftwerke durch Ausspeichern der Wärme sind Optimierungen dieser Wärmespeicher bezüglich der Kosten zu untersuchen.

- Hochtemperatur-Wärmeübertrager werden für manche Typen von Hochtemperatur-Wärmespeichern benötigt. Für eine kostenoptimale Auslegung sind Typ- und Materialauswahl zu berücksichtigen.
- Bei Druckluftspeicheranlagen müssen zwangsläufig Kompressor und Expander getrennt betrieben werden, der Kompressor beim Einspeichern der Druckluft, der Expander beim Ausspeichern. Leider werden zwar Kompressoren für beliebige Betriebsverhältnisse angeboten, aber nicht Expander. Diese gibt es nur für Eintrittstemperaturen bis ca. 700 °C, obwohl es kommerzielle Kraftwerksgasturbinen mit Eintrittstemperaturen in deren Turbinenteil/Expander bis 1200 °C gibt. Die Entwicklung von Expandern für Eintrittstemperaturen bis 1200 °C wäre nicht nur für die Kraftwerkstechnik eine sehr hilfreiche Maßnahme.

6.3.4 Innovations- und Technologiepotenziale

- Benutzerfreundliche Simulationstools sind eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg von Ingenieurbüros, d. h. also für kleine und mittlere Unternehmen.
- Unabhängig von regenerativen Energien sind bezüglich Flexibilität optimierte thermische Kraftwerke überall einsetzbar und daher weltweit gefragt.
- Auch der flexible Einsatz beliebiger Brenngase, insbesondere auch Wasserstoff, in thermischen Kraftwerken ist allgemein in vielen Anwendungsfällen, z. B. Industriekraftwerken mit Abfallverbrennung usw. von großem Nutzen.
- Wärmespeicher für Nieder-, Mittel-, und Hochtemperatur würden nicht nur für thermische Kraftwerke dringend gebraucht, sondern auch in vielen anderen Industriezweigen wie Chemie, Eisen und Stahl, Glas und Keramik usw. Dasselbe gilt natürlich auch für Hochtemperatur-Wärmeübertrager. Preiswerte Lösungen durch z. B. geschickte Materialkombinationen wären sehr begehrt.
- Hochtemperaturrexpander fehlen z. B. auch bei der Nutzung von Abwärme mit hohen Temperaturen z. B. bei der Nachverbrennung von Abgasen. Auch diese Entwicklung würde sicher weltweit auf eine breite Nachfrage stoßen.

6.3.5 Forschungstransfer

Wie schon im Abschnitt 6.3.2 beschrieben, arbeitet das InES mit folgenden Firmen auf den genannten Gebieten zusammen:

- Alstom, Siemens usw. (Kraftwerkshersteller)
- E.ON, RWE, Vattenfall, Stadtwerke, VGB usw. (Energieversorger/Kraftwerksbetreiber)
- U&I Hannover (Ingenieurbüro)
- ENCO Braunschweig (Ingenieurbüro)

7 Untergrundspeicher

7.1 Wasserstoffspeicherung in Kavernen und Porenspeichern

7.1.1 Einleitung

Einen prinzipiell möglichen Weg zur effizienten und netzverträglichen Integration der Wind- und Photovoltaikenergie in das Energiesystem stellt die Elektrolyse von Wasser mit anschließender Speicherung der Elektrolyseprodukte dar. Dieser Weg ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn für die Produkte eine Speichermöglichkeit zur Verfügung gestellt werden kann, die die großen Energiemengen aus den On- und speziell Offshore-Windkraftanlagen aufnehmen und somit eine Entkopplung von fluktuierender Energiebereitstellung und Energieabnahme gewährleisten kann. Die Untergrundspeicherung in Salzkavernen und Porenspeichern bietet das Potenzial, diese Energiemengen zu speichern. In Norddeutschland sind geeignete Lagerstätten zur Untergrundspeicherung von Wasserstoff in Salzkavernen und Porenspeichern in geographischer Nähe zu zahlreichen On-Shore-Windparks vorhanden. Die auch untermeerisch anstehenden Salzlagerstätten eröffnen die Möglichkeit, die bereits vorhandenen und weiterhin geplanten Offshore-Windkraftanlagen durch den Bau kurzer Leistungstrassen umweltfreundlich und ökonomisch effizient an den benötigten Speicherhohlraum anzuschließen.

Salzkavernen bieten die Möglichkeit, große Mengen Wasserstoff ein- und auszuspeichern. Bei Übertragung der Leistungsdaten aus der seit Jahrzehnten erprobten Erdgasspeicherung können Förderraten von mehreren Mio. m³ Wasserstoff je Tag und Kaverne bzw. kurzfristig Energieäquivalente erreicht werden, die einem fossil betriebenen Kraftwerk entsprechen. Kavernenspeicher sind somit sowohl für den Ausgleich hoher Leistungen, als auch zum Ausgleich saisonaler Schwankungen einsetzbar. Damit gehören diese Speicher zu den Langzeit-Energiespeichern.

Wasserstoff kann theoretisch auch in Porenspeichern (Aquifere, ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten) gelagert werden. Porenspeicher besitzen ein gegenüber Salzkavernen weitaus größeres Speichervolumen mit üblicherweise geringeren potentiellen Förderraten, aber der Möglichkeit von simultanem Ein- und Aus-speichern. Aufgrund ihrer Kapazität sind sie besonders für die saisonale Energiespeicherung von Bedeutung. In Norddeutschland sind zahlreiche alte bzw. nahezu ausgeförderte Erdgaslagerstätten vorhanden, die potentiell für die Einrichtung von Wasserstoffspeichern geeignet sind. Als wesentlicher Indikator für die mögliche Eignung ausgeförderter Erdgaslagerstätten zur Wasserstoffspeicherung wird die über geologische Zeiträume belegte Dichtheit gegenüber Erdgas eingeschätzt.

7.1.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal befasst sich seit mehr als 25 Jahren eingehend mit Fragestellungen zur geotechnischen Sicherheit von Salzkavernen. Zusammengefasst werden hierunter Fragestellungen zur Standsicherheit und Dichtheit von Solekavernen, Erdölspeicherkavernen, Erdgas-

speicherkavernen, Deponiekavernen und Druckluftspeicherkavernen während der Herstell-, Betriebs- und Nachbetriebsphase betrachtet. Den Anforderungen an die Analyse und Bewertung des Tragverhaltens von Salzkavernen entsprechend, umfassen die Kompetenzen des Lehrstuhls alle für die Dimensionierung von Salzkavernen erforderlichen Sachgebiete der numerischen Tragwerksanalyse, der laborativen Untersuchung der mechanischen, thermischen und hydraulischen Materialeigenschaften des anstehenden Salinargebirges, der Entwicklung von Stoffmodellen zur physikalischen Abbildung mechanisch-thermisch-hydraulisch gekoppelten Prozesse und der Entwicklung von Softwarecodes zur rechnerischen Prognose und onsite confirmation des in-situ Tragverhaltens. Die aktuell geplanten Untersuchungen zur Möglichkeit einer Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen sind entsprechend den Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt charakterisiert durch neuartige, bisher nicht analysierte Fragestellungen zu möglichen Wechselwirkungen zwischen dem Speichergestein Salzgebirge und dem Speichermedium Wasserstoff.

Untersuchungen zur Speicherung von Wasserstoff in Porenspeichern werden am Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ite) an der TU Clausthal durchgeführt. Das ite, Abt. Lagerstättentechnik ist auf dem Gebiet der experimentellen Bestimmung von Fluidtransporteigenschaften von Reservoirgesteinen und der numerischen Lagerstättensimulation seit über 30 Jahren aktiv. Es wurden einschlägige Forschungs- und Industrieprojekte mit dem Schwerpunkt auf der experimentellen Charakterisierung von konventionellen und geringpermeablen Lagerstättengesteinen, sowie Speichergesteinen aus den potentiellen Standorten der geologischen CO₂-Speicherung und der Simulation der Prozesse der gekoppelten geologischen CO₂-Speicherung und Enhanced Gas Recovery (EGR) durchgeführt.

Generell erstrecken sich die Forschungsarbeiten von der experimentellen lagerstättentechnischen Charakterisierung und numerischen Simulation der Prozesse in Erdgas-/ Erdöllagerstätten über die experimentellen und numerischen Analysen der in-situ Prozesse bei der gekoppelten CO₂ Speicherung und Enhanced Gas Recovery. Hierzu zählen z. B. Modellentwicklung zur Gaspermeation und Simulation des Produktionsverhaltens von Bohrungen in geringpermeablen Gaslagerstätten und Salzgebirge, experimentelle Bestimmung der Speicher- und Fließparameter des Speichergesteins sowie Prozesssimulation des CO₂-Pilotinjektionstests, Softwareentwicklung zur Katalogisierung und Korrelation der erhobenen gesteinsphysikalischen Daten für Gasformationen. In der jüngsten Zeit sind Studien über das geohydraulische und bio-geochemische Verhalten des Wasserstoffs bei der Wasserstoffspeicherung in Porenspeichern angelaufen. Die ersten Ergebnisse zu diesen Fragestellungen stehen nach dem Abschluss eines DGMK Projektes seit Ende August 2012 zur Verfügung. Das dreijährige Leuchtturm-Verbundvorhaben H2STORE „Untersuchung der geohydraulischen, mineralogischen, geo-mechanischen und biogenen Wechselwirkungen bei der Untertagespeicherung von Wasserstoff in konvertierten Gaslagerstätten“, das zum August 2012 mit der maßgeblichen Beteiligung der Institutionen der TU Clausthal, dem ITE und EFZN gestartet ist, wird erste experimentelle, sowie theoretische Erkenntnisse im Bereich der Gasvermischungsvorgänge sowie der biogenen und nichtbiogenen Wechselwirkungen des Wasserstoffs mit den Mineralien des Speichergesteins und Reservoirfluiden bei der Wasserstoffspeicherung in Porenspeichern liefern.

7.1.3 Forschungsbedarf

Bei der Wasserstoffspeicherung im geologischen Untergrund kann auf langjährige praktische Erfahrungen, besonders hinsichtlich der Untergrundspeicherung von Erd- und Stadtgas zurückgegriffen werden. Während Stadtgas zu über 50 % aus Wasserstoff besteht, wird reiner Wasserstoff als Rohstoff für die chemische und petrochemische Industrie seit vielen Jahren erfolgreich in Salzkavernen in Teesside (SABIC EUROPE), Großbritannien, und in Texas, USA, gespeichert.

Salzkavernen werden in Deutschland seit Mitte der sechziger Jahre erfolgreich für die Speicherung flüssiger und gasförmiger Energieträger eingesetzt. Derzeit wird in ca. 170 soltechnisch aufgefahrenen Salzkavernen ein Arbeitsgasvolumen von 7 Mrd. m³ gespeichert. Abhängig von der Kavernenkonfiguration und den standortbezogenen Gebirgseigenschaften erfolgt die Gasspeicherung unter maximalen Drücken von 200 bis 250 bar. Die Größe der Kavernenspeicher beträgt 400.000 bis 750.000 m³. Angesichts der großen Anzahl langjährig betriebener Erdgasspeicher-kavernen ist der Stand der Technik im Bereich der geomechanischen Tragwerksplanung für Salzkavernen insgesamt gekennzeichnet durch umfangreiche Erfahrungen in der geomechanischen Dimensionierung und Tragwerksanalyse. Vorstehende Aussage gilt jedoch nicht für die mögliche Speicherung von reinem Wasserstoff in Salzkavernen. Innerhalb Deutschlands existieren derzeit keine praktischen Erfahrungen mit der Speicherung von Wasserstoff in Salzkavernen. Von den zwei oben genannten Lokationen können Ausführungen zur Betriebsfahrweise und Dichtheit der Literatur nicht entnommen werden. Insgesamt bleibt damit zunächst festzustellen, dass die wenigen Informationen zur untertägigen Speicherung von reinem Wasserstoff zwar die grundsätzliche Machbarkeit vermuten lassen, für eine großtechnische Anwendung der Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen aber noch eingehende laborative und rechnerische Untersuchungen erforderlich sind.

Hierzu gehören insbesondere eingehende geotechnische Analysen zum Tragverhalten und zur Dichtheit einer Wasserstoffkaverne unter Berücksichtigung der thermodynamischen Auswirkungen einer Wasserstoffein- und -ausspeicherung für variierte Betriebsverfahren. Hierzu werden folgende Untersuchungen als unbedingt erforderlich eingeschätzt:

- Laborative Untersuchung der Festigkeits-, Kriech-, und Permeationseigenschaften von Steinsalz unter Einwirkung von reinem Wasserstoff mit einer Triaxialprüfanlage,
- Numerische Berechnungen zur Analyse des Tragverhaltens von Wasserstoffspeicherkavernen und ihrer Dichtheit unter Berücksichtigung variieter Betriebsfahrweisen.

Ein Stand der Technik für Laboruntersuchungen zur Wasserstoffpermeabilität von Salzgesteinen existiert nicht. Vielmehr ist davon auszugehen, dass angesichts der Zünd- und Explosionsgefahr, der Werkstoffversprödung und der bei Verwendung von Wasserstoff als Strömungsmedium gegebenen Migration der H₂-Moleküle in das Kristallgitter des Prüfmaschinenstahls besondere konstruktive Vorkehrungen vorzusehen sind. Da eine für diese Untersuchungen erforderliche Triaxialprüfanlage

kommerziell nicht verfügbar ist, ist beabsichtigt, aufbauend auf der 20-jährigen Erfahrung mit der Konstruktion und dem Bau felsmechanischer Versuchsanlagen eine geeignete Prüfanlage am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik in Eigenbau zu entwickeln.

Neben den oben genannten prinzipiellen Vorteilen von Porenspeichern handelt es sich bei ausgeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten um hydraulisch sowie mineralogisch und geochemisch hochkomplexe Systeme, die im Anschluss an die Erdöl- und Erdgasförderungen noch nicht wieder in einen geologischen Gleichgewichtszustand zurückgekehrt sind. Dieser Ungleichgewichtszustand wird durch die Injektion von Wasserstoff und seiner möglichen Begleitstoffe zusätzlich verstärkt. Für die Beurteilung ausgeförderter Erdöl- und Erdgaslagerstätten als potentielle Wasserstoffspeicher und die Formulierung der an sie zu stellenden geologischen Anforderungen ist deshalb ein grundlegendes Verständnis, der bei der geologischen Wasserstoffspeicherung in ausgeförderter Erdöl- und Erdgaslagerstätten ablaufenden Prozesse, unabdingbar.

Obwohl eine Gasspeichertechnologie in porösen Medien in Deutschland seit Jahrzehnten existiert und ein wichtiger Bestandteil der Erdgasversorgung ist, ist eine Wasserstoffspeicherung in Porenspeichern, wie Aquiferen und (nahezu ausgeförderten) Erdgaslagerstätten – obwohl theoretisch möglich – bisher (auch weltweit) nicht realisiert. Die Eignung solcher potentieller Porenspeicher ist abhängig von der Dichtigkeit/Integrität der Reservoirs bzw. der sie überlagernder Deckschichten und möglicher Wechselwirkungen zwischen dem injizierten Wasserstoff (und den technologisch bedingten Beimengungen anderer Gase, wie z. B. CO_2), den Lagerstättenfluiden (residuales Öl und Gas, wässrige hochsalinare Porenfluide) und dem Mineralbestand des Speichers. Solche Wechselwirkungen können u. a. zu Veränderungen der Fluidtransporteigenschaften des Speichergesteins, der Integrität der Deckschichten und der Rückgewinnungsrate des eingebrachten Wasserstoffes führen.

Zielsetzung bei der zukünftigen Forschung sollte es sein, ein umfassendes Verständnis von geohydraulischen, mineralogisch-geochemischen, fluidchemischen und biogenen Prozessen während der (Langzeit-) Speicherung von Wasserstoff in konvertierten Rotliegend Erdgaslagerstätten zu gewinnen und deren mögliche Auswirkungen auf die Langzeitspeicherkapazität, Gasvermischungsprozesse, Dichtigkeit der Deckgesteine und Fluidtransporteigenschaften des Speichergesteins und damit die Eignung von solchen Lagerstätten zur Wasserstoffspeicherung zu evaluieren. Forschungspotenzial besteht in folgenden Punkten:

- Klärung von möglichen bevorzugten Speicherhorizonten bzw. Fluidmigrationsbahnen und Barrierehorizonten,
- Gewinnung von Informationen über mineralogische Veränderungen in den Gesteinen und sich daraus ergebende Veränderungen in den Fluidtransport- und Abdichtungseigenschaften und somit auch Veränderungen der Speicherintegrität,
- Untersuchungen der Effekte der anorganisch-organischen Wechselwirkungen zwischen Lagerstättenfluiden und injiziertem Wasserstoff sowie Reservoir-

und Deckgesteinen und ihren organischen Bestandteilen bzgl. der Speicherintegrität,

- Bestimmung der geologischen Qualitätsanforderungen an den injizierten sowie die Zusammensetzung und Qualität des rückgeführten Wasserstoffs,
- Klärung, inwieweit biogene Komponenten im Reservoir durch eine Wasserstoffinjektion zu vermehrtem Wachstum und zu verstärkten Reaktionen mit dem mineralogischen Gesteinsbestand und Methanbildung angeregt werden,
- Modellbildung und Simulation zur Übertragung auf den Lagerstättenmaßstab und auf konvertierte Gaslagerstätten.

7.1.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Innovations- und Technologiepotenziale werden aufgrund der Tatsache, dass bisher ein Stand der Technik für die Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen nicht existiert sehr hoch eingeschätzt. Die grundsätzliche geomechanische Machbarkeit der großmaßstäblichen untertägigen Wasserstoffspeicherung soll im Rahmen der beabsichtigten Forschungen zum Tragverhalten und zur Dichtheit von Wasserstoffspeicherkavernen analysiert und aufgezeigt werden. Zielsetzung der geplanten Laboruntersuchungen ist neben den materialtechnologischen Untersuchungen die Entwicklung einer geeigneten Versuchstechnik zur Gewinnung der für die rechnerischen Analysen erforderlichen Materialparameter zur Quantifizierung des mechanisch-hydraulisch gekoppelten Materialverhaltens.

Der wesentliche Teil des vorgeschlagenen Forschungsprogramms soll sowohl die Theorie des gemischten Zweiphasenflusses als auch die Theorie dynamischer Systeme weiterentwickeln. Grundlegende Fragestellungen auf die dabei vertieft eingegangen werden muss, sind die Gasvermischungsphänomene während der Ein- und Auslagerung des Wasserstoffs in konvertierten Gaslagerstätten, die abiotische und biotische in-situ Reaktivität des Wasserstoffs, die viskose Gasfingerbildung sowie die damit verbundene Gasretention und Gasverluste. Da weltweit noch sehr wenige Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen

existieren, sind sie als innovativ anzusehen. Die Beantwortung solcher Fragestellungen hat eine fundamentale Bedeutung für die Beurteilung der technischen Machbarkeit der Wasserstoffspeicherung in ausgeförderten Gasreservoirs und Aquiferen und daher auch national und international eine strategische Bedeutung.

7.1.5 Forschungstransfer

Angesichts der bergrechtlich geforderten Nachweise zu Standsicherheit und Dichtheit von Kavernenspeichern einerseits und der sicherheitlichen Verantwortung der Speicherbetreiber andererseits ist ein Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis der Kavernenspeicherung unmittelbar gegeben.

Grundsätzlich besteht weltweit Interesse zur Verwertung der Forschungsergebnisse bei Industrieunternehmen, deren Geschäftsfeld im Bereich Gastransport und -

versorgung bzw. -speicherung liegt. Potenzielle Anwender dieser Forschungsergebnisse sind vor allem die deutschen und die in Deutschland ansässigen internationalen E&P, Energie- und Gasversorgungsunternehmen.

Die zu erwartenden Forschungsergebnisse können bei diesen Industrieunternehmen als Grundlage zur Beurteilung der technischen Machbarkeit von Wasserstoffspeicherung in ausgeförderten Gasreservoirs und Aquiferen genutzt werden. Die entwickelten mathematischen Modelle, numerischen Codes, Prozessanalyse- und -simulationen sowie die experimentell erhobenen Daten, können als Basisinstrument zur Erstellung von Entwicklungsplänen zur Speicherung von Wasserstoff genutzt werden.

7.2 Druckluftspeicherung in Kavernen und Porenspeichern

7.2.1 Einleitung

Druckluftspeicherkraftwerke (CAES, Compressed Air Energy Storage) speichern große Energiemengen in Form von Druckluft. Sie stellen ein alternatives Verfahren zu Pumpspeicherkraftwerken, die z. B. erfolgreich zur Aufnahme von Überschusskapazitäten und Bereitstellung von Spitzenlast und kurzfristiger Störungsreserve betrieben werden. Zurzeit werden im kommerziellen Maßstab zwei Anlagen betrieben, das CAES in Huntorf und das CAES McIntosh, USA. Zwei Forschungsprojekte ADELE und ISACOAST-CC betrachten die adiabate Druckluftspeicherung (s. Abschnitt physikalische Speicher), die einen höheren Wirkungsgrad als die bisher großindustriell verwirklichten Druckluftspeicher aufweist. Die existierenden CAES verwenden als Speicher Salzkavernen, die derzeit die einfachste Möglichkeit der Druckluftspeicherung darstellen. Druckluft kann aber auch in harten Gesteinsformationen und in porösen Formationen, wie tiefe saline Aquifere und ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, gespeichert werden. Unterschiede bestehen z. B. in der Förderrate, die bei Salzkavernen und harten Gesteinsformationen zehn Mal höher liegen, als bei porösen Gesteinsformationen (bei einer einzigen Bohrung pro Lagerstätte). Poröse Gesteinsformationen weisen eine höhere Speicherkapazität als Salzkavernen auf. Speicher in porösen Gesteinsformationen sind aber in der Erschaffung weitaus kostenintensiver als Salzkavernen. Die Speichereigenschaften und –entwicklungskosten sind hier abhängig vom Typ des Gesteins (Permeabilität, Porosität, Gesteinsdicke usw.). Eine geringe Permeabilität erfordert z. B. mehrere Bohrungen, um die erforderlichen Förderraten zu erlangen. Mehrere erforderliche Bohrungen wiederum erhöhen die Investitionskosten für den Speicher.

7.2.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Neben den grundlegenden geomechanischen Untersuchungen zum Tragverhalten von Druckluftspeichern im Rahmen der Projektstudie „Netzintegration von Offshore-Großwindanlagen: Grundlast aus der Nordsee“ hat der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik umfangreiche laborative und rechnerische Untersuchungen zum

Einfluss einer zyklischen Kavernenfahrweise auf das Tragverhalten des Salzgebirges im Rahmen verschiedener Industrieprojekte erarbeitet. Die im Forschungsprojekt ADELE durchgeführten Laborversuche zum Einfluss einer zyklisch wechselnden Beanspruchung auf das transiente und stationäre Kriechverhalten von Steinsalz und ihre Auswertung erfolgten durch das gesteinsphysikalische Labor des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik.

Das Institut für Erdöl- und Erdgastechnik untersuchte in dem Projekt „Evaluation of Underground Storage Options for CAES Plants“ die bereits existierenden und zukünftig realisierbaren Möglichkeiten zur unterirdischen Druckluftspeicherung. Es wurden Untergrundspeicher in porösen, harten und Salzgesteinen auf Ihre Einsatzmöglichkeiten und -grenzen anhand der Simulationsprogramme ECLIPSE (Lagerstätte) und PROSPER (Bohrloch) untersucht. Darüber hinaus wurden Untersuchungen mit dem Simulationsprogramm ECLIPSE bzgl. der Temperaturabhängigkeit der Leistung eines CAES in einer ausgeförderten Erdgaslagerstätte durchgeführt.

7.2.3 Forschungsbedarf

Aktuelle geomechanische Untersuchungen zur Druckluftspeicherung beinhalten Arbeiten zur Analyse des Kriech- und Festigkeitsverhalten von Steinsalz bei zyklischer Beanspruchung oberhalb und unterhalb der Dilatanzfestigkeit, die darauf abzielen aufzuzeigen, ob und inwieweit es möglich ist, zeitlich und quantitativ begrenzte Schädigungen des konturnahen Steinsalzgebirges und eine nachfolgende Schädigungsrückbildung bzw. Verheilung durch die Entwicklung erweiterter Stoffmodellformulierungen hinreichend realitätsgetreu rechnerisch abzubilden und zu prognostizieren. Hierzu gehören auch und insbesondere Langzeitversuche an Salzgesteinen unterschiedlicher Fazies zur Analyse und zum Beleg der thermomechanischen Materialeigenschaften bei zyklisch wechselnder mechanischer und thermischer Beanspruchung in Verbindung mit der Entwicklung und Erprobung der erforderlichen Mess-, Regel- und Versuchstechnik.

Als durch die bisher vorliegenden Untersuchungen noch nicht abschließend belegt eingeschätzt, werden insbesondere

- das thermomechanische Tragverhalten von Salzgesteinen bei zyklisch wechselnder Temperatur,
- das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Salzgesteinen bei abgesenkten Temperaturen ($T < 25\text{ °C}$),
- die Auswirkungen der durch zyklische Ein- und Ausspeicherung von Druckluft thermisch induzierten Druck- und Zugspannungen in Wechselwirkung mit einem partiell dilatant verformten Salzgebirge,
- die Auswirkungen thermisch induzierter Zugrisse auf die Permeabilität bzw. Dichtigkeit des konturnahen Salzgebirges.

Forschungsbedarf für die Druckluftspeicherung besteht insbesondere bei der Beschreibung der chemischen und physikalischen Effekte bei der Speicherung in porösen Medien wie z. B.:

7 Untergrundspeicher

- Einfluss von Temperatureffekten auf die Leistungscharakteristik des Speichers sowie Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix sowie Geochemische Prozesse,
- Untersuchung der Dichtheit des Abdeckgesteins für das zu erwartende Druckregime,
- Korrosion der Bauwerk Bohrung und der Obertageanlagen durch die Produktion von Lagerstättenwasser,
- Benötigte Kissen- bzw. Arbeitsgasmengen,
- Reaktion von Luftsauerstoff und Gesteinsmatrix und der Einfluss auf die Zusammensetzung des Kissengases,
- Untersuchung der Zementintegrität (Einfluss der Komponenten der Luft auf den Zement)

7.2.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Ungeachtet der in Deutschland bereits installierten Windenergieleistung und der Bestrebungen diese weiter auszubauen bleibt aktuell zu konstatieren, dass die für eine Zwischenspeicherung der fluktuierenden Windenergie zumindest als im Grundsatz als geeignet eingeschätzte Druckluftspeicherung großtechnisch bis heute noch nicht realisiert ist. Aus geomechanischer Sicht werden die Innovations- und Technologiepotenziale zum derzeitigen Entwicklungsstand weniger in der grundsätzlichen Machbarkeit als in der gegenständlichen Erprobung, Optimierung und Realisierung gesehen.

7.2.5 Forschungstransfer

Angesichts der Tatsache, dass bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Starkwindzeiten eine temporäre Trennung der Windenergieproduzenten vom elektrischen Netz erforderlich ist, um Netzüberlastungen zu vermeiden, wird eingeschätzt, dass bei nachgewiesener Machbarkeit der Druckluftspeicherung ein unmittelbarer Transfer der Erkenntnisse in den industriellen Anwendungsbereich erfolgen wird.

8 Stoffliche Speichersysteme

8.1 Einleitung

Die Umwandlung volatiler erneuerbarer Energien (Windenergie-, Photovoltaik-Strom) in stoffliche (chemische) Speicher wie Wasserstoff, Methan, Flüssigkraftstoffe oder auch chemische Grundstoffe wie z. B. Methanol ist von besonderer Bedeutung für die Transformation der Energieversorgung, da so Energiemengen im Bereich von TWh über nahezu unbegrenzte Zeiträume gespeichert und über Monate hinweg aus- und eingespeichert werden können. Neben dem eigentlichen Speicherprozess ist dabei auch die nachfolgende Energienutzung zu betrachten, um eine ganzheitliche Bewertung unterschiedlicher Verfahrensketten zu ermöglichen.

So können als Beitrag zur Stabilität der elektrischen Netze zum einen Überschusskapazitäten durch das Wandeln von elektrischem Strom in stoffliche Energieträger gespeichert (z. B. Zwischenspeicherung im Erdgasnetz) und zum anderen durch Rückverstromung bei Engpässen im elektrischen Netz wieder zur Verfügung gestellt werden. Hier ergibt sich eine komplexe Kopplung des elektrischen Netzes mit dem Gasnetz.

Mit der Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Wasserstoff können aber auch chemische Transformationsschritte implementiert werden, um etablierte Energieträger alternativ oder ergänzend zu der H_2 -Rückverstromung zu erzeugen. Für die unterschiedlichen Prozesspfade lassen sich technologische Kennzahlen wie Wirkungsgrade und wirtschaftliche und ökologische Aspekte konkurrierender Prozessketten vergleichen.

Ausgehend von der Betrachtung des Wirkungsgrades, sind Wandlungsschritte grundsätzlich zu minimieren, denn jede Wandlung bedeutet einen Wirkungsgradverlust. So ist die direkte Anwendung von Wasserstoff z. B. in der chemischen Industrie das primäre Ziel. Ist eine solche Anwendung aber nur eingeschränkt möglich oder im Vergleich unwirtschaftlich, so sind weitere Umwandlungsschritte erforderlich.

Generell stehen für die weitere stoffliche Nutzung von Wasserstoff zwei Prozessvarianten zur Verfügung. Mittels der Methanisierung wird der gasförmige Energieträger SNG (synthetic natural gas) und mittels der Fischer-Tropsch-Synthese flüssige Energieträger wie z. B. Kraftstoffe hergestellt. Auch chemische Grundstoffe wie Methanol sind über entsprechende Syntheseverfahren generierbar. Für alle Prozessvarianten ist eine Kohlenstoffquelle (z. B. CO_2 , CO) erforderlich. Diese Kohlenstoffquelle kann aus Industrieabgasen oder aber thermochemisch aus fossilen und nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Als Beispiele seien die Kopplung von Elektrolyse- H_2 und Biomasse z. B. zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen (mittels Fischer-Tropsch-Synthese) und deren anschließende Nutzung in Verbrennungsmotoren oder die Erzeugung von SNG aus H_2 und CO_2 oder Biogas mit anschließender Einspeisung in das Erdgasnetz genannt. Es handelt sich dabei also nicht um eine reine Zwischenspeicherung von elektrischem Strom, sondern vielmehr um eine Transformation in gut speicherförmige und bereits verbreitete Energieträger. Die Nutzung von vorhandener hochwertiger Infrastruktur und

8 Stoffliche Speichersysteme

Endenergieverbrauchern stellt in diesem Fall einen schwer zu quantifizierenden Zusatznutzen dar.

Ziele und Forschungsbedarf bei der stofflichen Speicherung haben eine hohe strategische und systemorientierte Komponente. Faktoren wie z. B. vorhandene Windparks, regionale Biomasseverfügbarkeit oder lokale Wasserstoffinfrastruktur und die Notwendigkeit, abgestimmte kurz-, mittel- und langfristige Lösungswege aufzuzeigen, erfordern eine Schwerpunktsetzung, deren Konsequenzen in den folgenden Anwendungsbeispielen diskutiert werden.

Die Umwandlung fluktuierender Strommengen in Wasserstoff mittels Elektrolyse und die bedarfsgerechte Rückverstromung z. B. mittels hocheffizienter Brennstoffzellen eröffnet neue Chancen für die zukünftige Energieversorgung. Die H₂-Einspeisung in das Erdgasnetz und die Nutzung in dezentralen KWK-Anlagen mit hohem Gesamtwirkungsgrad können den Übergang vom aktuell grundlastorientierten hin zu einem dezentralen und bedarfsorientierten Energiesystem beschleunigen. Der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur beschleunigt auch die Einführung von Brennstoffzellen, sowohl für die stationäre Energieversorgung als auch im Mobilitätssektor. Durch die Kopplung von Brennstoffzellen und Batteriesystemen im Fahrzeug lassen sich die bisherigen technologischen Hürden hinsichtlich Reichweite und Ladedauer reduzieren.

Des Weiteren kann elektrolytisch erzeugter Wasserstoff als Ausgangsstoff für weitere gut speicherbare stoffliche Energieträger wie Methan oder Flüssigkraftstoffe genutzt werden. Der Ausbau der Elektrolysekapazitäten und die Verbesserung von Effizienz, Dynamik und Lebensdauer ist insofern eine Voraussetzung für die Umwandlung fluktuierender Energiemengen in stoffliche Speichersysteme.

Durch Hydrierung von Kohlenmonoxid (CO) oder Kohlendioxid (CO₂) mit Elektrolyse-Wasserstoff kann Methan bzw. bei Nutzung von Biogas als Einsatzstoff Bio-SNG erzeugt werden, welches dann mit geringem Aufwand in dem bestehenden Erdgasnetz zwischengespeichert, verteilt und den Endanwendern zur Verfügung gestellt werden kann. Damit wird eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Energieerzeugung und -verbrauch erzielt, ohne dass kostenintensive Verteilinfrastrukturen neu aufzubauen oder technische Änderungen bei den Endabnehmern vorzunehmen sind. Die Speicherkapazität des deutschen Erdgasnetzes liegt dabei mit 217 TWh¹ um mehr als den Faktor 5.000 über der aktuellen Speicherkapazität von Strom mit lediglich 0,04 TWh².

Auch die für Niedersachsen wichtige Nutzung von Biogas lässt sich durch die Integration von regenerativ erzeugtem Wasserstoff deutlich ausbauen. Bisher ist es erforderlich, dass bei der Vergärung ebenfalls erzeugte CO₂ abzutrennen, um die geforderte Einspeisequalität sicherzustellen und das Erdgasnetz als Infrastruktur zu nutzen. Dieser Prozess ist verlustbehaftet und nur für große Biogasanlagen

1 47 Untertage-Gasspeicher (zzgl. 79 TWh in Bau/Planung), Stand 2008

2 Pumpspeicherwerke, Stand 2008

wirtschaftlich darstellbar. Steht Wasserstoff aus regenerativen Quellen zur Verfügung, kann das CO_2 zu Methan hydriert werden. An Stelle der CO_2 -Abtrennung erfolgt also eine chemische CH_4 -Anreicherung bis auf Einspeisequalität.

Noch höhere Speicherkapazitäten als für Erdgas sind in Deutschland aktuell nur für Flüssigkraftstoffe vorhanden. Die bevorrateten Mengen an Benzin, Diesel, Kerosin und Heizöl EL betrugen im Jahr 2008 rund 250 TWh. Die Erzeugung erneuerbarer flüssiger Kohlenwasserstoffe auf Basis der Fischer-Tropsch-Synthese erfolgt aus kohlenstoffhaltigen Ausgangsstoffen (z. B. Biomasse oder CO_2 aus fossilen Quellen). Die bisher noch vergleichsweise geringen Gesamtwirkungsgrade der Verfahrenskette von unter 40 % lassen sich durch die Integration von Wasserstoff deutlich steigern.

8.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Niedersächsische Forschungsinstitute arbeiten an vielfältigen Fragestellungen im Bereich stofflicher Speichersysteme. In der folgenden Aufstellung sind die Schwerpunkte der jeweiligen Forschungseinrichtungen in diesem Themenfeld kurz skizziert.

- **Institut für Chemische Verfahrenstechnik (TU Clausthal)**
 - Synthese von Methan (SNG) und flüssigen Kohlenwasserstoffen
 - Entwicklung von Katalysatoren und Reaktorkonzepten für die technische Umsetzung
- **Fakultät Versorgungstechnik (Ostfalia):**
 - Betrieb eines regenerativen Energieparks mit Photovoltaik- und Windenergieanlagen, Elektrolyseuren, H_2 -Speicher und Rückverstromung (z. B. Brennstoffzelle, E-Fahrzeug)
 - Systemtechnik, Zusammenspiel der verschiedenen Erzeuger und Speichertechnologien (inkl. Abwärmenutzung)
 - Hybridsysteme/Kommunikation
- **CUTEC Institut**
 - Erzeugung flüssiger Kraftstoffe (Diesel, Kerosin usw.) und Bio-SNG-Synthese durch thermochemische Biomassekonversion im Technikumsmaßstab
 - Effizienzsteigerung bei der Biomassekonversion und Biogasproduktion z. B. durch Nutzung von Wasserstoff
 - Betrieb eines Energieparks mit dezentralen Energiewandlern und -speichern
 - Entwicklung von Brennstoffzellensystemen
 - Erprobung und Charakterisierung von Flüssigkraftstoffen
 - Systemanalysen zur Einbindung stofflicher Speicher in vorhandene Infrastrukturen
- **EFZN**
 - Untersuchung von windbasierten stofflichen Speichersystemen an der Modellregion Niedersachsen (Wasserstofferzeugung, Speicherung, Umwandlung zu gasförmigen und flüssigen Energieträgern und Infrastruktur)

- Untersuchung von Abgasströmen verfahrenstechnischer Prozesse hinsichtlich der Verwendung für die Produktion synthetischer gasförmiger und flüssiger Energieträger
- Synergieeffekte zwischen fossil- und regenerativ-betriebenen Anlagen
- Untersuchung der Eignung stofflicher Speicher zum Erhalt der Systemsicherheit
- **NEXT ENERGY**
 - Herstellung und Speicherung von Wasserstoff und anderen gasförmigen bzw. flüssigen Energieträgern (z. B. Ammoniak, Erdgas)
 - Bedarfsgerechte Elektrolyse zu Wasserstoff (aus Überschüssen)
 - stoffliche Verwertung von Energieträgern in μ -KWK-Systemen
 - Speicherung mit Methanol und Verwertung in DMFC
- **Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (TUBS)**
 - Nutzung von Ammoniak als Energiespeicher und seine Herstellung über Power-to-Gas

8.3 Forschungsbedarf

Aufgrund der dargestellten komplexen Kopplungsmöglichkeiten unterschiedlicher Prozessschritte zur Speicherung volatiler Energien erscheint eine singuläre Betrachtung und Optimierung einzelner Verfahrensschritte als unzureichende Lösungsstrategie. Vielmehr sind zunächst anhand konkreter Anwendungsbeispiele mögliche Verfahrensketten hinsichtlich ihrer ökonomischen und ökologischen Auswirkungen zu untersuchen und zu bewerten. Die Einzelprozesse müssen dann in Hinblick auf das Gesamtverfahren und die gegebenen Randbedingungen (z. B. regionaler Wärmebedarf, Einspeisepunkte, Sauerstoffnutzung, CO₂-Quellen usw.) angepasst und optimiert werden. Unter Berücksichtigung der im Land vertretenen Kompetenzen in Industrie und Forschungseinrichtungen werden folgende F&E Schwerpunkte gesehen:

- Systemorientierte Analyse komplexer stofflicher Energiespeichersysteme hinsichtlich Effizienzsteigerung und Erhöhung der Nutzungsdauer,
- Entwicklung von Verfahren und Apparaten für die Zwischenspeicherung von Wasserstoff zum Dynamikabgleich zwischen fluktuierender Windstromerzeugung und (möglichst) stationärer Synthese der Zielprodukten,
- Anlagen- und Verfahrensoptimierung bei der thermochemischen und biologischen Biomassekonversion mit Integration von erneuerbarem Wasserstoff und Sauerstoff,
- Katalysatorentwicklung für neue Synthesen von Chemie- und Kraftstoffen auf Basis von Wasserstoff und CO₂,
- CO₂-Abscheidung aus Abgasen der Energiewirtschaft sowie der Grundstoff- und Chemischen-Industrie mittels verbesserter Absorptionsverfahren und -mittel oder Membranverfahren,
- Entwicklung, Analyse und Bewertung von Multi-purpose-Konzepten auf Basis von Wasserstoff aus der Elektrolyse (Brennstoffzelle, Biogas, Biomasse, CO₂, Kraftstoff- und Methan-Synthese, Speicherung usw.),
- Systemorientierte Anlagen- und Verfahrensoptimierung einzelner Prozessstufen,

- Abbau von Hemmnissen beim Aufbau einer Wasserstofflogistik (Speicherung, Einspeisung, Fahrzeugbetankung usw.).

8.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Niedersachsen hat große Chancen wesentliche Teile seiner Energieversorgung auf Erneuerbare umzustellen und damit bundesweit Maßstäbe zu setzen und die Technologieführerschaft zu erlangen. Für beteiligte Unternehmen aus der Energiewirtschaft (z. B. EVU und kommunale Energieversorger, Netzbetreiber, Windparkbetreiber), der Mobilitätsbranche aber auch aus dem landwirtschaftlichen Bereich (z. B. Biomasse- oder Biogas- Produzenten) resultieren daraus verbesserte Marktchancen. Ingenieur- und Planungsbüros würden ebenso wie Anlagenbauer und Komponentenentwickler von der Energiewende profitieren. Aufgrund der Komplexität des Energieversorgungssystems bedarf es aber der intensiven Unterstützung von Forschung und Industrie durch die niedersächsische Politik. Die Nutzung von Windenergie zur Wasserstofferzeugung und die Konversion von kohlenstoffhaltigen Ausgangsstoffen wie Biomasse bieten hier aufgrund des bereits erreichten Status und der vorhandenen Potenziale viel versprechende Ansatzpunkte und sind die Grundlage für viele Prozesse.

Mit dem Übergang von der Grundlasterzeugung zur Stromerzeugung aus fluktuierenden Quellen ist eine Zunahme zeitlicher Preisschwankungen mit zum Teil sogar negativen Strompreisen zu erwarten. Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft basierend auf der Elektrolyse kann einen wesentlichen Beitrag zur bedarfsgerechten Stabilisierung und Dekarbonisierung der Energieversorgung leisten. Zusätzlich wird die Basis für den Einsatz von Brennstoffzellen, auch und im Besonderen, in der Elektromobilität geschaffen. Die wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle wird beispielsweise in der Antriebs- und Energiestrategie von Volkswagen als sinnvolle Ergänzung (z. B. als range extender) zur Batterie gesehen.

Unter dem Stichwort „Power-to-Gas“ gibt es seitens der niedersächsischen Industrie vielfältige Aktivitäten, volatile Energie in gut speicherbares Methan umzuwandeln und damit das Erdgasnetz als bestehende und gut ausgebaute Infrastruktur zu nutzen (z. B. EWE Aufbereitungsanlage in Werlte). Die zukünftige Integration von Wasserstoff zur Aufbereitung und Einspeisung von Biogas ist dabei für das Flächenland Niedersachsen besonders bedeutend. Derzeit kommt bereits jede dritte aus Biogasanlagen erzeugte Kilowattstunde Strom aus Niedersachsen. Damit hat Niedersachsen die Spitzenposition in Deutschland und Europa inne. Auch die Nutzung von aufbereitetem Biogas als Kraftstoff für den Mobilitätssektor wird in der niedersächsischen Industrie mit großem Interesse verfolgt (z. B. SunGas-Projekt von Volkswagen AG und der Raiffeisen Warengenossenschaft e.G., Jameln).

Auch zukünftig wird ein wesentlicher Anteil der Mobilitätswirtschaft auf die Verfügbarkeit flüssiger Kraftstoffe angewiesen sein. Insbesondere im Bereich der Luftfahrt aber auch im Transport- und Schwerlastverkehr ist eine Alternative zu etablierten Flüssigkraftstoffen wie Kerosin oder Diesel nicht erkennbar. Die Herstellung solcher Flüssigkraftstoffe auf Basis kohlenstoffhaltiger aber CO₂-neutraler Ausgangsstoffe wie Rest- und Abfallbiomasse oder unter Nutzung von CO₂ aus fossilen Quellen (z. B. aus Kraftwerksabgasen) kann durch die Integration von

Wasserstoff aus der Elektrolyse deutlich effizienter und damit wirtschaftlicher gestaltet werden. Damit können auch Unternehmen aus der Luftfahrtindustrie sowie Logistik und Transportunternehmen einen Beitrag zur Verminderung des Verbrauchs fossiler Ressourcen leisten und gleichzeitig ihre Wettbewerbsfähigkeit behalten.

8.5 Forschungstransfer

Der Transfer der Forschungsergebnisse durch niedersächsische/norddeutsche Unternehmen erfolgt sowohl durch hier ansässige Konzerne als auch durch KMU, die in den entsprechenden Themen aktiv sind. Grundsätzlich werden die folgenden Hauptadressaten für die Umsetzung gesehen:

- Volkswagen AG: Flüssigkraftstoffe, Biogas (SunGas®), H₂-Brennstoffzelle
- EWE AG: Power-to-Gas-Verfahren, Biogas-Aufbereitung und Einspeisung
- Airbus: Bio-Kerosin
- H.C. Starck: Katalysatorherstellung, Materialien für Brennstoffzellen
- Solvay GmbH: Elektrolyse
- Salzgitter AG: Produktion von stoffl. Energieträgern aus Abgasen bzw. Prozessgasen wie Gicht- und Konvertergas der Stahlindustrie und Wasserstoff
- E.ON Avacon: Biogas-Aufbereitung und -einspeisung

9 Physikalische/Mechanische Speicher

Zu den physikalischen bzw. mechanischen Speichern gehören Schwungmassen-, Druckluft-, Pump- und Wärmespeicher. Diese Speicherformen gehören zu den Kurzzeitspeichern, wobei hier in zentrale und dezentrale Kurzzeitspeicher unterschieden werden sollte.

Schwungmassenspeicher können sehr hohe Leistungsspitzen bei sehr kurzen Reaktionszeiten im Millisekundenbereich liefern, ihr Energiegehalt und damit die Entladezeit sind jedoch auf den Minutenbereich begrenzt. Pump- und Druckluftspeicher verfügen demgegenüber über große Energieinhalte. Diese Speicher stellen eine hohe Leistung im Stundenbereich zur Verfügung.

9.1 Pumpspeicherwerke

9.1.1 Einleitung

Pumpspeicherwerke³ (PSW) übernehmen im Stromnetz verschiedene Funktionen: Sie werden zum Ausgleich von Bedarfsspitzen und Lastschwankungen, Vorleistungen zu allen Systemdienstleistungen, der Frequenz- und Spannungshaltung, zur Betriebsführung, zum Versorgungsaufbau (Anfahren eines Kraftwerkes) sowie zum Ausgleich fluktuierender Energie eingesetzt. Sie können im Bedarfsfall in etwa einer Minute ihre gesamte Leistung bereitstellen (Turbinenbetrieb) oder abnehmen (Pumpbetrieb).

In internationalen Elektroenergiesystemen stellen PSW seit Jahrzehnten oftmals die einzige großtechnische wirtschaftlich umsetzbare Art der Energiespeicherung dar. Von den weltweit installierten Kapazitäten von ca. 75 GW entfallen auf Deutschland rund 6,7 GW bzw. 40 GWh. Bei Volllast entspricht dies einer maximalen Entladedauer von knapp 6 Stunden.

Das Spektrum reicht von Anlagen im kleineren MW Bereich bis zu dem bislang größten deutschen PSW Goldisthal mit 1060 MW. Der Wirkungsgrad der Bestandsanlagen reicht von rund 56 % bis zu 77 % mit einem durchschnittlichen Wert von ca. 69 %. Neuere Anlagen würden jedoch bei einem Verhältnis der ausgespeicherten zur eingespeicherten Energie von 75 bis 80 % liegen.

Bei Überschusskapazitäten im elektrischen Netz wird Wasser von einem unteren Wasserreservoir in ein oberes gepumpt. Dadurch wird elektrische Energie in potentielle Energie des Wassers umgewandelt. Wenn Energie bereitgestellt werden soll, kann das Wasser durch ein Druckrohr in ein tiefer gelegenes Becken fließen – dabei wird die gespeicherte potentielle Energie in kinetische Energie des

³ Wenn das PSW über keinen natürlichen Wasserzufluss verfügt, ist die Anlage – wie jeder andere Speicher auch – keine Energieerzeugungseinheit und es wird üblicherweise von einem Pumpspeicherwerk gesprochen. Im Gegensatz zu einem Pumpspeicherkraftwerk, wenn ein natürlicher Zufluss besteht und somit Energie erzeugt wird.

abströmenden Wassers umgewandelt und treibt eine Turbine an. Diese ist wiederum an den Generator gekoppelt, um die Drehbewegung in Strom umzuwandeln.

Vorteile von PSW gegenüber anderen Speichertechnologien sind der vergleichsweise sehr hohe Wirkungsgrad sowie die geringe Lebensdauereinbuße bei einer hohen Zyklenhäufigkeit. Des Weiteren stellen die schnelle Anfahrzeit und die hohe Flexibilität wesentliche Vorzüge dieser Speicheroption dar, wobei hierbei eine Abhängigkeit von der maschinentechnischen Seite zu berücksichtigen ist: Man unterscheidet ternäre Maschinensätze (räumliche Trennung von Pumpe und Turbine) und reversible Maschinensätze (Pumpturbinen, bei denen Pumpe und Turbine eine Einheit bilden) sowie die verschiedenen Turbinenarten, welche jeweils etwas andere Betriebskennzahlen aufweisen. Die Umschaltzeiten bewegen sich daher in einem Bereich von unter einer Minute bis hin zu wenigen Minuten. Ein ternärer Maschinensatz benötigt deutlich kürzere Umschaltzeiten und besitzt auch höhere Leistungsgradienten. In Bezug auf die Turbine sind Werte von 20 MW/s und sogar darüber hinaus möglich. Sofern eine Regelfähigkeit zwischen 0 bis 100 % sowohl für den Turbinenbetrieb als auch für den Pumpenbetrieb gewünscht wird, ist ein ternärer Maschinensatz notwendig. Aber auch eine drehzahlvariable Pump turbine ermöglicht mit einer Drehzahlsteuerung (zumindest in gewissen Grenzen) eine Leistungsregelung im Pumpbetrieb.

Das deutschlandweite Ausbaupotenzial muss trotz einiger optimistischer Potenzialanalysen verschiedener Bundesländer als begrenzt angesehen werden. Bereits durch die notwendige Bedingung einer ausreichenden Höhendifferenz zwischen den Reservoirs wird das Potenzial durch die geologischen Gegebenheiten eingeschränkt. Des Weiteren stellen der massive Eingriff in die Natur und das Landschaftsbild mehr denn je Hürden bei der Realisierung derartiger Großprojekte dar, wie aktuelle Vorhaben zeigen. Durch diese Probleme in Kombination mit der heutigen Marktsituation für netzstabilisierende Dienstleistungen erreichen diese konventionellen PSW derzeit keine ausreichende Rentabilität, um einen Neubau anzustoßen.

Zur Minimierung der o. a. Genehmigungs- und Akzeptanzprobleme konventioneller PSW wurden zwischenzeitlich verwandte Varianten als neue Energiespeicheroptionen entwickelt. Dies geschieht derzeit beispielsweise am EFZN. Hier wurde die technische Machbarkeit der Nachnutzung von stillgelegten Bergwerken durch untertägige PSW (PSWuT) nachgewiesen. Diese Projektidee konnte bislang noch nicht praktisch umgesetzt werden, da die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen noch unzureichend sind, technische Detailfragen einer Klärung bedürfen und spezifische genehmigungsrechtliche Zuständigkeiten untersucht werden müssen.

9.1.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Am EFZN wurde das Projekt "Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke" durchgeführt, bei dem das Potenzial für untertägiger PSW in Deutschland abgeschätzt und mögliche Pilotstandorte vorgeschlagen wurden. Darüber hinaus wurde am EFZN die betriebswirtschaftliche Machbarkeit in der

Studie „Wirtschaftlichkeit eines untertägigen Pumpspeicherwerks“ untersucht. Die folgenden Institute waren an den Projekten beteiligt:

- EFZN
 - Koordination und Projektplanung
- Institut für Elektrische Energietechnik (TU Clausthal)
 - Integration des untertägigen PSW in das örtliche Versorgungsnetz in Kombination mit (Offshore-)Windkraftanlagen
 - Simulation mittels Energiemanagementsystem
 - Betrachtung von Netzengpässen und Studien zur weiteren Entwicklung des öffentlichen Energieversorgungsnetzes um geeignete Standorte zu identifizieren
- Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (TU Clausthal)
 - Bundesweite Recherche potentieller Standorte und ihre kartographische Darstellung
 - GIS-basierte 3D-Detailplanung von untertägigen PSW an ausgewählten Standorten
 - GIS-basierte 3D-Trassenplanung für Hochspannungsleitungen
- Institut für Bergbau (TU Clausthal)
 - Kriterien für die Standortauswahl
 - 3-D-Modellierung in Vulcan der Grubenbauten
 - Modellierung des Fließverhaltens in den Grubenbauten mit ANSYS
 - Bewetterungs- und Fluchtkonzept
 - weitere bergmännische Aspekte, wie Abraum-Management
- Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (TU Clausthal)
 - Überprüfung der Standsicherheit untertägiger Wasserreservoirs
 - Erfordernisse für die untertägige Installation der Maschinen
 - Erforderliche Verbindungsgrubenbauten
- Institut für Maschinenwesen (TU Clausthal)
 - Auslegung geeigneter Maschinensätze
 - Simulation der Gesamtlage aus maschinentechnischer Sicht
 - Besonderheiten bei der Installation unter Tage, z. B. Installation und Instandhaltung
 - Kostenabschätzung der Maschinen und deren Installation
- Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (TU Clausthal)
 - grundlegende Darstellungen zu genehmigungs-, eigentums-, energie- sowie haftungsrechtlichen Fragestellungen
 - Schwerpunkt-Betrachtung der Genehmigungsbedürftigkeit
 - Voraussetzungen für eine Genehmigung (insbesondere nach immissionsschutzrechtlichen, bergrechtlichen, wasserrechtlichen, baurechtlichen, abfallrechtlichen und energiewirtschaftsrechtlichen Vorschriften sowie nach dem Recht der Umweltverträglichkeitsprüfung)
- Institut für Wirtschaftswissenschaft (TU Clausthal)
 - betriebswirtschaftliche Betrachtung von untertägigen PSW
 - Kostenplan für das Auffahren der erforderlichen Untertage-Bauten

- Bestimmung der Investitionskosten durch einen Bottom-up-Ansatz
- Kostenvergleich von potenziellen Speichertechnologien
- Akzeptanzbetrachtung

9.1.3 Forschungsbedarf

Während der Bau von oberirdischen PSW bereits Stand der Technik ist, gilt es bei dem innovativen Konzept untertägiger PSW spezielle Aspekte bei Bau, Betrieb und Nachnutzung zu beachten. Die am EFZN erstellte Studie liefert erste theoretische Überlegungen zu diversen Themen und zeigt Forschungsbedarf in folgenden Gebieten auf:

- Gesamtwirtschaftliche Analyse der Energiewende im Hinblick auf die Notwendigkeit von Speichern
- Volkswirtschaftlicher Wert von Speichern zur Erhaltung des Netzstabilität
- Nutzen von PSWuT für das Elektroenergiesystems (z. B. durch eine theoretische Analyse mittels der Software Quintessence)
- Optimierungsbedarf im Themengebiet Stromanschluss
- Kostensenkungspotenzial durch Standardisierung
- Potenzialstudie zur (mechanischen) Energiespeicherung in Niedersachsen
- Genehmigungsrechtliche Untersuchungen

Insbesondere die Kosten-Nutzen-Betrachtung aus volkswirtschaftlicher Perspektive sowie eine Potenzialuntersuchung der (mechanischen) Energiespeicherung des Landes Niedersachsen sind erforderlich, um die tatsächliche Bedeutung dieser Technologie objektiv bewerten zu können und somit eine konkrete Hilfestellung für die Investitionsentscheidung potentieller Investoren geben zu können.

Des Weiteren ist es zwingend erforderlich für potentielle Standorte belastbare Daten zu generieren, um die theoretischen Erkenntnisse zu validieren. Der Bau einer Pilotanlage zu Forschungs- und Erprobungszwecken sowie als Referenz ist daher unbedingt anzustreben. Im Rahmen der Entwicklung und anhand einer solchen Anlage können weitere Forschungsvorhaben konkretisiert werden:

- 3D-Planungs- und Dokumentationssystem zur transdisziplinären Bewertung von Standortkriterien (technisch, geologisch, rechtlich und wirtschaftlich), zur Steuerung und Kontrolle des Baufortschrittes und zur Dokumentation von Erfahrungswerten im Betrieb,
- Qualitätsanforderungen an das Speicherwasser,
- Strömungsoptimierung der Speicher- und Sammelstrecken unter Berücksichtigung gebirgsmechanischer Randbedingungen,
- Abrasiver Verschleiß durch Sedimente und dessen Einfluss auf die Stand- und Betriebssicherheit,
- Anforderungen an die Dichtigkeit des Gesteins, bzw. ausgewählter Abdichtungsmaterialien,
- Optimierung des Be- und Entlüftungssystems,
- Einfluss des dynamischen Betriebes auf das Speichersystem und das umgebende Gebirge,

- Untersuchung eines realitätsnahen Wirkungsgrades dieser Technologie.

9.1.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Das Problem der ausgereiften und effizienten PSW Technologie ist der enorme Oberflächenverbrauch und die damit einhergehende geringe gesellschaftliche Akzeptanz. Des Weiteren besitzt Niedersachsen lediglich im Süden die erforderlichen Höhenunterschiede durch Mittelgebirge und somit insgesamt ein eher geringes geographisches Potenzial. Das innovative Konzept der untertägigen PSW umgeht jedoch alle genannten Problematiken (kaum Flächenverbrauch), nutzt sämtliche Vorteile aus (sehr hoher Wirkungsgrad in Kombination mit hoher Leistung und relativ hoher Energie) und bietet darüber hinaus noch neue Chancen für Niedersachsen:

- Realisieren von hohen Fallhöhen in Flachland-Regionen, wie Norddeutschland, wird möglich,
- Potenzielle PSW-Standorte im Harz haben eine kurze Distanz zum Entstehungsort der Fluktuationen in den Wind- bzw. Starkwindregionen,
- Niedersachsen ist durch die Vorarbeit des EFZN zurzeit Spitzenreiter in diesem Wissensgebiet,
- Untertägige PSW könnten Niedersachsen als Energieland Nummer 1 auch bei zukünftig steigendem Speicherbedarf eine Vorreiterstellung verschaffen.

9.1.5 Forschungstransfer

Das abgeschlossene Projekt hat Interesse in weiten Teilen der Industrie gefunden. Die folgenden Unternehmen haben sich aktiv an den Untersuchungen beteiligt:

- Regionaler Energieversorger Harz Energie GmbH & Co. KG
- Wasserkraftwerksausrüster Voith Hydro GmbH & Co. KG
- Schachtbauunternehmen Deilmann-Haniel Shaft Sinking GmbH
- Volkswagen Kraftwerk GmbH
- Umweltplanungsbüro OECOS GmbH
- Bergarchiv Clausthal
- Schachtbau Nordhausen
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie LBEG

Verschiedene weitere Industriepartner haben Interesse bekundet und hoffen auf die Fortsetzung dieses vielversprechenden Ansatzes. Die vom EFZN am 21. und 22. November 2013 veranstaltete Tagung „Unkonventionelle Pumpspeicher“ repräsentierte mit fast 150 Teilnehmern die Bedeutung dieses Ansatzes.

9.2 Druckluftspeicherkraftwerke

9.2.1 Einleitung

Druckluftspeicherkraftwerke können, so wie Pumpspeicherwerke, kurzfristig mehrere 100 MW Leistung für mehrere Stunden in das elektrische Netz einspeisen oder aus diesem entnehmen und daher über längere Zeit zur Systemstabilität beitragen.

Darüber hinaus sind sie in der Lage aus dem Stillstand zum Erhalt der Systemstabilität Regelleistung in Form der Sekundärregelung und Minutenreserve zur Verfügung stellen. Wenn sie in Betrieb sind, können sie sich auch an der Primärregelung beteiligen.

Des Weiteren können sie netzunabhängig starten und zum Wiederaufbau des Netzes nach einem Zusammenbruch (Schwarzstartfähigkeit) beitragen. Sie sind den konventionellen Gasturbinenkraftwerken deshalb überlegen, weil sie nicht nur Regelleistung erzeugen, sondern bei Stromüberangebot auch aus dem elektrischen Netz Leistung aufnehmen, speichern und bei Bedarf wieder abgeben können.

Für die Speicherung der Luft können z. B. bergmännisch aufgefahrenen, unterirdischen Hohlräume in dichtem Gestein und vor allem ausgesolte Salzkavernen in Salzstöcken im Untergrund verwendet werden, wie sie bereits in großem Umfang für die Erdgasspeicherung usw. genutzt werden. Auch Porenspeicher mit einem noch größeren Speichervolumen als es Kavernen üblicherweise aufweisen und dem Vorteil der simultanen Ein- und Ausspeichermöglichkeit bei allerdings relativ kleineren Förderraten, stellen eine Speicheroption dar. Für kleinere Speichervolumina und evtl. für den dezentralen Einsatz stehen Röhrenspeicher zur Verfügung. Da sich die Speicher (außer das Solependelbecken) im Untergrund oder unter Wasser befinden, wird der Eingriff in die Natur im Gegensatz zu den Pumpspeicherwerken (ausgenommen Pumpspeicherwerke unter Tage) auf ein Minimum reduziert.

Ein Druckluftspeicherkraftwerk (Compressed Air Energy Storage - CAES) nutzt die Energie komprimierter Luft. In Schwachlastzeiten, d. h. in Zeiten geringer Stromnachfrage und einem Überangebot an regenerativ erzeugter elektrischer Energie, verdichten elektrisch angetriebene Kompressoren die aus der Umgebung angesaugte Luft in Abhängigkeit der Kavernentiefe auf bis zu 100 bar. Die dabei entstehende heiße Druckluft (bis zu 1000 °C) wird aus Festigkeits- bzw. Stabilitätsgründen der Kaverne (Salz fließt bei Temperaturen über etwa 50 °C zu stark und die Salzkavernen würden sich bald schließen) und wegen der Speicherdichte (bei höheren Temperaturen kann weniger Luftmasse im gleichen Volumen gespeichert werden) auf nahezu Umgebungstemperatur abgekühlt und in die Kaverne gedrückt. In Zeiten hoher Stromnachfrage und zu wenig regenerativ erzeugtem elektrischen Strom wird die Druckluft in einer Turbine, die einen Generator antreibt, entspannt. Die Druckluft ersetzt dann den in einer herkömmlichen Gasturbine erforderlichen Verdichter, der einen Großteil (ca. 2/3) der Gasturbinenleistung benötigt. Da sich die Luft bei der Entspannung stark abkühlt

und der in der Luft enthaltene Wasserdampf kondensieren und eventuell gefrieren und die Turbine beschädigen würde, muss die Luft vor dem Eintritt in die Turbine ausreichend vorgewärmt werden.

Zur Erwärmung der Luft kann die Kompressionswärme verwendet werden, wenn sie in einem Wärmespeicher zwischengespeichert wurde. Solche Anlagen werden adiabate Druckluftspeicherkraftwerke genannt.

Wurde die Kompressionswärme einfach über Kühler (Wärmeübertrager) an die Umgebung abgeführt, um die hohen Investitionskosten von Wärmespeichern zu vermeiden und/oder den Verdichterwirkungsgrad durch Zwischenkühlung zu verbessern, kann die Temperatur der Druckluft in z. B. mit Biomasse oder fossilen Brennstoffen befeuerten Lufterhitzern (Wärmeübertragern) oder auch direkt durch Verbrennung von Brenngasen in den Gasturbinenbrennkammern erhöht werden. Solche Druckluftspeicherkraftwerke, die die Verdichtungstemperatur nicht für die Erwärmung der Druckluft verwenden, werden als diabat bezeichnet. Der Wirkungsgrad diabater Druckluftspeicherkraftwerke mit moderaten Gasturbineneintrittstemperaturen liegt bei ca. 50 %. Dieser relativ niedrige Wirkungsgrad ist die Folge der Wärmeverluste bei der Kühlung der verdichteten Luft und der erforderlichen Zufeuerung von Erdgas usw.

Ein Druckluftspeicherkraftwerk mit diabater Technologie (Abgabe der Kompressionswärme an die Umgebung und Zufeuerung von Erdgas zur Vorwärmung beim Ausspeichern) ist im niedersächsischen Huntorf seit 1978 in Betrieb. Es weist einen Wirkungsgrad von 42% auf, kann 8 Stunden eine Leistung von 60 MW aufnehmen und 2 Stunden eine Leistung von 290 MW abgeben und arbeitet in einem Druckbereich zwischen 50 und 70 bar. In Huntorf stehen 2 Kavernen mit je 150.000 m³ zur Verfügung.

Ein ähnliches diabates Druckluftspeicherkraftwerk ist in McIntosh/USA seit 1991 in Betrieb. Dort wird die kalte Druckluft vor der Gasturbinenbrennkammer in einem Rekuperator durch die Abwärme der heißen Abgase vorgewärmt. Die Anlage weist aus diesem Grund einen etwas höheren Wirkungsgrad von 54 % auf. Es steht ein Kavernenvolumen von 538.000 m³ in einer Teufe von 450 bis 750 m zur Verfügung. Der Arbeitsdruckbereich liegt zwischen 45 und 75 bar. Die Ladezeit beträgt 45 Stunden mit einer Leistung von 60 MW, die Entladezeit 26 Stunden mit einer Leistung von 110 MW.

Huntorf und McIntosh sind weltweit die einzigen großen industriell genutzten Druckluftspeicherkraftwerke.

Um die Nachteile der heutigen Konzepte, vor allem den niedrigen Wirkungsgrad, zu vermeiden, werden derzeit vor allem zwei weitere Konzepte entwickelt.

An dem Konzept ADELE – Adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung arbeitet ein Projektteam an einer Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage – AACAES – Anlage, bei der die Verdichtungswärme, die bei der Einspeicherung anfällt, durch den Einsatz eines Wärmespeichers zur Erwärmung der Druckluft bei der Ausspeicherung genutzt wird. Der Wirkungsgrad kann dadurch auf ca. 70 % angehoben werden. Der Fokus in diesem Projekt liegt in der Klärung der

übergreifenden maschinentechnischen und thermodynamischen Fragestellungen und in der Erarbeitung der bestmöglichen Konfiguration für Kompressor, Turbine, Wärmespeicher, Kaverne und weiteren Anlagenaggregaten. Ziel ist die Erstellung eines angebotsreifen Konzeptes für die Gesamtanlage und die Errichtung einer Demonstrationsanlage. Diese Anlage soll mit einer Leistung von 90 MW und einer Speicherkapazität von 360 MWh verwirklicht werden.

Das zweite Konzept wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

9.2.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Im Rahmen der E.ON International Research Initiative (EIRI) wurde in einem Forschungsvorhaben am EFZN, am Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik InES der TU Braunschweig und dem Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie an der RUB – Ruhruniversität Bochum in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen, vor allem mit E.ON und KBB Underground Technologies GmbH das ISACOAST-CC-Konzept eines ISobaric Adiabatic COMPRESSED Air Energy Storage –Combined Cycle d. h. eines GuD-Druckluftspeicherkraftwerks mit Wärmespeicher entwickelt.

Beispielhaft wurden als Basis für die Auslegung zwei der derzeit größten stationären Gasturbinen und ein Abhitzedampferzeuger samt Wasserdampfturbine mit doppelter Leistung, wie er üblicherweise hinter einer Gasturbinen angeordnet wird, verwendet, wobei je zwei Kompressoren und zwei Gasturbinen zum Ausgleich der Axialkräfte zweiflutig angeordnet wurden. Es wurden auch die Vor- und Nachteile einer mechanischen und einer elektrischen Kopplung von Kompressoren und Turbinen untersucht. Ferner wurden die weiteren, wesentlichen Komponenten wie Wärmespeicher (drei verschiedene Typen) und die Salzkavernen samt Rohrleitungen und Solependelbecken (um den Druck nahezu konstant zu halten) ausgelegt und die Gesamtanlage dynamisch simuliert. Mit diesem Konzept sind mehrere Betriebsarten möglich:

- **Einspeicherbetrieb:** Beim Einspeichern wird der Kompressor von einem Elektromotor angetrieben, der eine entsprechende überschüssige elektrische Leistung aus dem Netz nimmt. Die Druckluft gibt ihre Kompressionswärme an den Wärmespeicher ab und verdrängt die Sole aus der Kaverne und drückt sie in das oberirdische Solependelbecken.
- **Ausspeicherbetrieb:** Beim Ausspeichern läuft die Sole zurück in die Kaverne und verdrängt die Druckluft, die zuerst über den Wärmespeicher strömt und dadurch nahezu auf die ursprüngliche Kompressor-Austrittstemperatur vorgewärmt wird. Es sind zwei Ausspeicherbetriebsarten möglich: Ausspeicherung ohne Zufeuerung in der Gasturbinenbrennkammer und ohne Abhitzedampferzeuger oder Ausspeicherung mit Zufeuerung und GuD-Betrieb (Speicherwirkungsgrad Strom zu Strom dann über 80 %).

Druckluftspeicherkraftwerke eignen sich wegen des hohen Wirkungsgrads und der hohen Investitionskosten vor allem für den Wärmespeicher für häufig benutzte Kurzzeitspeicherung elektrischer Energie.

Diese Anlage kann auch ohne Druckluft- und Wärmespeicher als normale GuD-Anlage mit Wirkungsgraden von über 60 % (bzw. über 80 % mit Fernwärmeauskopplung) gefahren werden und ist damit ihr eigenes „Schattenkraftwerk“, was ein wesentlicher Kostenvorteil gegenüber anderen Speicherarten ist, die bei leeren Speichern nutzlos sind. Sie kann in dieser Betriebsart überdies auch Wasserstoff aus Elektrolyseuren (bis zu 50 % des gesamten Brennstoffs) oder SNG verwenden. Damit ist auch ein Langzeitspeicherbetrieb möglich, bei dem z. B. der mit regenerativen Energien erzeugte Wasserstoff oder SNG wie üblich in Gaskavernen über lange Zeiträume gespeichert wird.

Die Generatoren und Motoren der Anlage können auch für den Phasenschieberbetrieb (Blindleistungskompensation) im Leerlauf verwendet werden.

Eine Anlage, die auch als GuD-Anlage betrieben werden kann, setzt einen bestimmten in etwa konstanten Druck und damit z. B. eine Kaverne in geeigneter Teufe voraus. Stehen nur tiefere Kavernen zur Verfügung, sind zusätzliche Kompressoren und Expander als „Topping Cycle“ nötig. Dasselbe gilt für Anlagen die einen Speicher mit variablem Druck benutzen.

Sind die Austrittstemperaturen von Kompressor und Gasturbine ähnlich, wie bei den heutigen großen stationären Gasturbinen üblich, so kann der Wärmespeicher ersetzt werden durch einen druckaufgeladenen Abhitzedampferzeuger und sofort wieder Strom mit dem von der Dampfturbine angetriebenen Generator erzeugt werden. Das mindert zwar die Leistung, die aus dem elektrischen Netz entnommen werden kann, spart aber die hohen Kosten für den Wärmespeicher, die über denen eines druckaufgeladenen Abhitzedampferzeugers plus der dann nötigen Druckluftvorwärmung mit einem z. B. mit Biomasse oder preiswerten fossilen Brennstoffen gefeuerten Wärmeübertragers liegen dürften. Auf die Druckluftvorwärmung in einem Wärmeübertrager kann aber auch verzichtet werden. In diesem Fall muss aber mit einem höheren Einsatz eines teuren gasturbinentauglichen Brennstoffs zur Verbrennung in der Brennkammer gerechnet werden.

9.2.3 Forschungsbedarf

Sowohl das Konzept ADELE als auch ISACOST-CC waren für Großkraftwerke entwickelt worden. Der Markt für solche Anlagen liegt aber eher bei kleineren Größen. Als erste Aufgabe soll das Marktpotenzial für kleinere Anlagen bei Betreibern von Windenergieanlagen und kommunalen Stromerzeugern ermittelt werden. Dabei soll in Zusammenarbeit mit diesen Unternehmen ermittelt werden, welches Konzept (CAES oder ISACOST-CC) und welche Anlagengröße/-leistung am wirtschaftlichsten von diesen Unternehmen eingesetzt werden kann. ADELE und ISACOST-CC sollen an diese sicher kleinere Größe angepasst werden. Die neuen Entwürfe sollen mit Komponenten entwickelt werden, die kommerziell verfügbar sind oder von einem Hersteller stammen, der bereit ist, die vorgeschlagenen Modifikationen im Auftragsfall kurzfristig umzusetzen.

9.2.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Das InnovationsPotenzial liegt darin, aus kommerziell verfügbaren Komponenten ein Stromspeichersystem nahe am Produktions- und Verbrauchsstandort aufzubauen, das über einen sehr hohen Wirkungsgrad verfügt. Dadurch kann der bei steigendem Anteil der regenerativen Stromerzeugung unausweichliche Ausbau des Stromnetzes reduziert und das elektrische Netz selbst stabilisiert werden.

Das TechnologiePotenzial liegt in dem Know-how der Systementwicklung, d. h. dem optimalen Zusammenfügen der besten kommerziell verfügbaren Komponenten. Zudem verbleibt die Wertschöpfung der regenerativen Stromerzeugung zu einem größeren Anteil in Niedersachsen und insbesondere bei Kommunen und KMU.

9.2.5 Forschungstransfer

Der Forschungstransfer erfolgt bereits für das ADELE Projekt projektbegleitend mit den Unternehmen Ed. Züblin AG, der Erdgasspeicher Kalle GmbH, GE Global Research, der Ooms-Ittner-Hof GmbH und der RWE Power AG. In das ISACOST-CC Projekt sind E.ON und KBB Underground eingebunden. Diese Unternehmen werden voneinander profitieren können und es werden für den Bau der für diese Anlagenkonzepte angepassten Bauteile Fertigungsunternehmen, auch im Bereich der KMU, neue Herausforderungen finden. Es ist davon auszugehen, dass diese Konzepte auch internationale Sichtbarkeit erlangen und somit ein internationaler Transfer dieser Technologie erfolgen kann.

9.3 Wärmespeicher

9.3.1 Einleitung

Die Wärmespeicherung dient wie jede Speicherung dem Ausgleich zwischen Produktion/Anfall und Bedarf/Verbrauch. Von großer Bedeutung für das Speichersystem und damit indirekt auch für den Wärmespeicher ist, ob anfallende Wärme (oder Kälte) gespeichert und dann wieder als Wärme (oder Kälte) verwendet werden soll, oder, ob z. B. Strom in Wärme umgewandelt, als Wärme gespeichert und dann wieder als Strom ins elektrische Netz eingespeist werden soll. Bei den Wärmespeichern, die anfallende Wärme z. B. athermischen Solarkollektoren speichern, bestimmt die anfallende Wärme das Temperaturniveau. Soll z. B. Strom in Form von Wärme zwischengespeichert werden, ist wegen des Carnot-Wirkungsgrades ein möglichst hohes Temperaturniveau gefragt, und Energiewandler sind wesentliche Bestandteile des Speichersystems.

Bei volatilen regenerativen Energien wie Wind und solare Strahlung besteht natürlich ein besonderer Bedarf an Speichern, wobei zwischen Kurzzeit (z. B. Tag/Nacht)- und Langzeit (z. B. Sommer/Winter)-Speichern zu unterscheiden ist. Bei

ersteren stehen die Wirkungsgrade im Vordergrund, bei letzteren die Investitionskosten.

Wärme kann entweder direkt (Wärmeträger = Speichermedium) oder indirekt (Wärmeträger und Wärmespeichermedium sind unterschiedlich) gespeichert werden. Bei der indirekten Wärmespeicherung wird zwischen aktiven (Speichermedium wird zirkuliert) und passiven (Speichermedium ist ortsfest) Speichern unterschieden. Weitere Unterscheidungsmerkmale betreffen die Form der Wärme (sensibel, latent (Schmelzwärme, Verdampfungswärme)) oder den chemisch-physikalischen Vorgang (Reaktionswärme und Sorption).

Aus dieser sehr kurzen Übersicht ist schon zu erkennen, dass eine ungeheure Fülle von Wärmespeichermaterialien, Wärmespeicherformen bzw. -typen und Wärme- bzw. Energiespeichersystemen gibt.

9.3.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Wie bereits im Abschnitt 9.2 Druckluftspeicher erwähnt, wurde das ISACOAST-CC-Konzept eines Isobaric Adiabatic Compressed Air Energy Storage Combined Cycle d. h. eines GuD-Druckluftspeicherkraftwerks mit Wärmespeicher von niedersächsischen Partnern entwickelt.

Dabei entstanden auch die Entwürfe für drei Typen von Wärmespeichern: Feststoff-(Sand-)Rippenrohr-Wärmespeicher, 4-Tank-Speichersystem mit Salzen und Thermoöl und mit zwei Wärmeübertragern und ein 2-Tank Thermocline-Speichersystem, ebenfalls mit zwei Wärmeübertragern und unterschiedlichen Füllkörpern.

9.3.3 Forschungsbedarf

Forschungsbedarf besteht vor allem in der Modellierung, Simulation und Optimierung von Wärmespeichern und Wärmespeichersystemen, da die Auslegung von Wärmespeichern verschiedene stochastische und nur schwer vorhersagbare Einflüsse und auch das dynamische Verhalten von Wärmeeinspeisern und Wärmeverbrauchern einbeziehen muss. Der Beitrag dieser Energiespeicher zur Integration erneuerbarer Energien, insbesondere eines hohen Windenergieaufkommens durch Druckluftspeicher mit Wärmespeichern oder nur Wärmespeichern mit Elektrowärme und Nutzung der Wärme in einem Rankine-, Joule oder Kombi-Prozess zur erneuten bedarfsgerechten Stromerzeugung sollte gerade in Niedersachsen zeitnah untersucht werden, da hier möglicherweise der Aufbau sehr viel teurerer elektrischer Energiespeicherkapazitäten oder elektrischer Netze mit hohen Leistungen reduziert werden könnte. Ferner sind auch noch Forschungsarbeiten zu Speicher- und Isoliermaterialien und zu Wärmeträgerfluiden nötig.

9.3.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Das InnovationsPotenzial liegt in der Entwicklung von Wärmespeichern und Wärmespeichersystemen mit einem sehr hohen Wirkungsgrad sowohl für niedrige

(ca. 100 °C) als auch insbesondere für hohe Temperaturen (mehrere 100 bis 1000 °C).

Das TechnologiePotenzial ist wegen des sehr unterschiedlichen Temperaturniveaus sehr vielfältig und reicht von Energieeinsparungen und vermehrtem Einsatz regenerativer Energien für Heizung und Klimatisierung bis zur Stromspeicherung (zusammen mit Druckluft oder nur Hochtemperaturwärme).

9.3.5 Forschungstransfer

Der Forschungstransfer erfolgt durch direkten Kontakt zu Industrieunternehmen, bevorzugt KMU aus Niedersachsen, z. B. U&I in Hannover oder ENCO in Braunschweig, sowie Vorträgen auf Tagungen, Publikationen in nationalen und internationalen Zeitschriften und Dissertationen.

9.4 Schwungmassenspeicher

9.4.1 Einleitung

Schwungmassenspeicher besitzen wie Doppelschichtkondensatoren und supraleitende magnetische Energiespeicher im Vergleich zu elektrochemischen Speichern geringe Energieinhalte. Wie diese kann ihre Leistung aber innerhalb von wenigen Millisekunden bereitgestellt werden. Sie sind deshalb als Kurzzeitspeicher gut geeignet und dienen hauptsächlich zur Glättung von kurzzeitigen Last- und Leistungsschwankungen (Sekundenreserve), zur Erzielung hoher Leistungsspitzen (z. B. Anfahrvorgänge von Generatoren), zur Überbrückung von Leistungsunterbrechungen (Notstromversorgung, unterbrechungsfreie Stromversorgung) und zur Speicherung sonst nichtnutzbarer Energie in mobilen und stationären Systemen (z. B. von Bremsenergie in elektrischen Fahrzeugen des Nahverkehrs). Nachteilig sind die relativ hohen Ruheverluste. Durch die Weiterentwicklung glasfaser- und kohlefaserverstärkter Kunststoffe für die Schwungmassen lassen sich höhere Drehzahlen und damit größere spezifische Energieinhalte als mit Schwungmassen aus Metallen bewerkstelligen.

Ein großer Vorteil von Schwungmassenspeicher gegenüber elektrochemischen Speichern wie Batterien ist die sehr hohe erreichbare Zyklenzahl von bis zu 10^6 Zyklen. Es handelt sich um ein rein elektromechanisches System, dessen Teildisziplinen Leistungselektronik und Elektromaschinenbau einen hohen Forschungsstand aufweisen. Dieses hat zur Folge, dass „Quantensprünge“ in der Energie- und Leistungsdichte nicht mehr zu erwarten sind.

9.4.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Am Institut für elektrische Maschinen, Antrieb und Bahnen (IMAB) der TU Braunschweig lag bisher der Schwerpunkt bei der Auslegung von getriebelosen

Energiewandlern mit hohem Wirkungsgrad und berührungslosen Lagerungen zur Vermeidung zusätzlicher mechanischer Verluste sowie in der Entwicklung von Leistungselektronikschaltungen für hohe Zwischentaktfrequenzen bei hohen Leistungen. Darüber hinaus wurden Festigkeits- und Rotordynamikuntersuchungen durchgeführt. Die Einbindung von Energiespeichern in Energiesysteme erfordert numerische Simulationen, für die entsprechende Rechenmodelle der Speicher entwickelt werden müssen. Die Entwicklung solcher Rechenmodelle ist Teil der kontinuierlich laufenden Aktivitäten am IMAB.

In Zusammenarbeit mit dem DLR Braunschweig werden Rotorstrukturen aus Kohlefaser entwickelt, die auf dem Naben-Schwungring Konzept basieren, so dass teures Fasermaterial vorwiegend dort eingesetzt wird, wo es auch zum Trägheitsmoment beiträgt. Die Kopplung von Schwungring und Nabe erfolgt hierbei durch eine neuartige, leichte, vorgespannte Koppelstruktur, so dass sich eine wesentlich günstigere gravimetrische Energiedichte ergibt.

Bei den Speichersystemen ist deren Einbindung und Betrieb im Netz Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Am IMAB der TUBS (Prof. Canders) wurden im Rahmen eines Leitprojektes des BMWi Schwungmassenspeicher für Netzanwendungen im Power Quality Bereich (10 kWh, 2 MW) untersucht. Vorrangiges Ziel war die Reduzierung der Bereitschaftsverluste um den Faktor 10 durch neuartige Energiewandler und inhärent stabile berührungsfreie Lager mit Hochtemperatursupraleitern.

9.4.3 Forschungsbedarf

Schwungmassenspeicher werden heute als kommerzielles Produkt angeboten, in Europa vorwiegend in konventioneller Ausführung mit Stahlschwungrad oder als Faserverbundrotor mit Wälzlagerung. Faserverbundrotoren mit wesentlich höherer Energiedichte und berührungsfreier Lagerung gibt es zurzeit nicht am Markt. Hier haben amerikanische Firmen (z. B. Beacon, AFS Trinity oder Vycon) einen Vorsprung. Eine Etablierung dieser Technologie wird nicht zuletzt auch durch sehr aufwändige Prüfverfahren und fehlende Prüfstandards behindert.

Bei den Schwungmassenspeichern moderner Bauart mit Faserverbundrotoren und berührungsfreier Lagerung besteht somit Forschungsbedarf bei

- Sicherheitsaspekten (Berstverhalten, Lagerversagen, Containmentgestaltung),
- Theorie des Versagensverhaltens des Speichers und Prüfverfahren,
- Entwicklung von Prüfstandards,
- Faserwickeltechnik,
- Lagerverlustreduzierung bei berührungsfreien Lagern, (Ummagnetisierungsverluste bei aktiven Magnetlagern, Kryotechnik für supraleitende Lager),
- Entwicklung hocheffizienter Energiewandler mit niedrigen Bereitschaftsverlusten.

Generell ist der Forschungsbedarf bei den elektrischen Maschinen sowohl in der Weiterentwicklung bestehender Konzepte zu höheren Leistungen an der mechanischen Drehzahlgrenze als auch bei Maschinentopologien mit kleiner

Auferregungszeit zu sehen. Aufbauend auf den Untersuchungen verschiedener Firmen und Forschungsstellen aus den 90er Jahren und zu Beginn dieses Jahrhunderts müssen die Potenziale moderner Werkstoffe zur Erweiterung der Grenze der Umfangsgeschwindigkeit elektrischer Maschinen beleuchtet werden. Dies wird besonders bei Turbomaschinenantrieben deutlich, bei denen für getriebelose Konzepte beispielsweise Leistungen von 10 MW bei Drehzahlen bis 20.000 1/min gefordert werden. Für den motorischen Betrieb werden wegen der tendenziell kleinen Induktivitäten solcher Maschinen extrem hohe Zwischentaktfrequenzen des speisenden Wechselrichters benötigt, die mit hart schaltenden IGBTs nicht mehr erreichbar sind. Hier werden neuartige Schaltungstopologien und ggfs. auch neue Bauelemente (z. B. SiC) benötigt.

In Niedersachsen ist das Unternehmen Piller, der Weltmarktführer für kommerzielle Schwungräder, die überwiegend für sehr große USV-Anlagen eingesetzt werden, ansässig. Piller hat historisch eine gute Zusammenarbeit mit dem IMAB der TU Braunschweig, so dass hier ebenfalls herausragendes wissenschaftliches Know-how vorhanden ist. Trotz dieser Konstellation wird dieser Bereich nicht als Forschungsschwerpunkt der niedersächsischen Wissenschaft erachtet.

9.4.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Die aus der Schwungmassenspeichertechnologie folgenden wesentlichen Aufgabenfelder

- Faserverbundwickeltechnik und Strukturmechanik,
- berührungsfreie Lagerungen (aktive magnetische Lagerungen, supraleitende Lagerungen) verbunden mit Werkstofftechnologie und Kryotechnik,
- hochtourige elektrische Maschinen,
- Leistungselektronik mit hohen Zwischentaktfrequenzen.

beinhalten Innovations- und Technologiepotenziale. Die hier zum Einsatz kommenden Technologien werden weltweit mit hohem Aufwand untersucht. Dementsprechend groß sind auch die Möglichkeiten, durch eigene Schutzrechte Marktpositionen abzusichern oder auszubauen.

9.4.5 Forschungstransfer

Hierzu ist ein Technologietransfer an interessierte Firmen und Start-up-Unternehmen erforderlich, die allerdings in Niedersachsen bisher nur in sehr geringem Umfang vorhanden sind (beispielsweise Piller Power Systems, Nexans, Invent (als KMU), MAN-Renk). Deshalb waren die Kontakte des IMAB bisher vorwiegend auf Industriepartner im süd- und westdeutschen Raum ausgerichtet (Siemens, GE, Converteam, Atlas Copco Energas, BOC Cryostar, Honeywell, Babcock Borsig).

10 Netze

Eng im Zusammenhang mit der Nutzung und dem Betrieb von Speichern steht der Ausbau von Versorgungsnetzen, sowohl bei den elektrischen Übertragungs- und Verteilnetzen, den Erdgastransport- und -verteilnetzen als auch bei den Wärme- und Kältenetzen. Dabei werden dem Ausbau und der Optimierung vorhandener Infrastrukturen Vorrang gegenüber neu zu installierenden Leitungen eingeräumt. Wenn Netzausbaumaßnahmen ausgeschöpft sind, werden Speichertechnologien hinzukommen. Speicher können übergangsweise dort Vorteile bieten, wo sich Engpässe aufgrund langer Planungs- und Genehmigungszeiträume für Netze abzeichnen und möglicherweise auch Netzausbaumaßnahmen minimieren.

Auch wenn im Folgenden die drei Energienetzbereiche getrennt voneinander aufgeführt werden, ist jedoch insbesondere in der Koordination zwischen diesen Bereichen bei Planung und im Betrieb ein künftiger Schwerpunkt der Energienetzforschung zu empfehlen. Hierbei ist insbesondere die integrierende und koordinierende Funktion der Energienetze zwischen Energieerzeugern bzw. Energieeinspeisern, Energienutzern und Speicherbetreibern zu beachten. Da Energienetze natürliche Monopole darstellen, ist dabei auch die rechtliche bzw. regulatorische Ebene in Untersuchungen einzubeziehen. Auch die Integration mit Informations- und Kommunikationsstrukturen (Kapitel 11) sollte einen wesentlichen Schwerpunkt der Energienetz-Forschungstätigkeiten bilden.

10.1 Elektrische Netze

10.1.1 Einleitung

Die Belastung elektrischer Netze wird weiter steigen, z. B. müssen zukünftig hohen und starken Fluktuationen unterworfenen Energietransite in den Übertragungsnetzen von den Gebieten regenerativer Erzeugung in die Ballungs- und Industriezentren erfolgen. Gleichzeitig wird die stabilisierend wirkende und steuerbare konventionelle Kraftwerksleistung reduziert. Damit fehlt zukünftig zum einen die frequenzstabilisierende Wirkung der großen rotierenden Massen der konventionellen thermischen Kraftwerke sowie deren Beteiligung an der Bereitstellung von Regelleistung zur Frequenzregelung. Zum anderen muss die Aufgabe der Spannungs-Blindleistungsregelung von anderen Betriebsmitteln zunehmend übernommen werden, da auch diese Aufgabe bislang im Wesentlichen von den thermischen Kraftwerken übernommen wird. Der Kraftwerksneubau und Netzausbau sehen sich Akzeptanzproblemen ausgesetzt; dennoch müssen Großstörungen und Stabilitätsprobleme vermieden werden. In den Verteilungsnetzen kommt es zunehmend zu Rückspeisungen aus den unteren Spannungsebenen und zu Spannungshaltungsproblemen. Regional und in bestimmten Zeiträumen übersteigt die eingespeiste Leistung den lokalen Verbrauch. An den Einspeisepunkten wird die Spannung entsprechend angehoben, was sich auf das lokale Verteilungsnetz entsprechend auswirkt. Mögliche Lösungsansätze für die Bewältigung der zukünftigen Übertragungs- und Verteilungsaufgaben können im

Ausbau der Drehstromnetze (HDÜ) und der Errichtung eines Overlay-Netzes (HGÜ), in der Nutzung neuer Betriebsmittel wie dem regelbaren Ortsnetztransformator, dem Ausbau von Speichern für elektrische Energie sowie einer Verbesserung der dezentralen Versorgungssysteme (z. B. U-Regelung von PV-Anlagen) gesehen werden. Generell verlangt eine Dezentralisierung der Energieerzeugung zukünftig auch nach einer Dezentralisierung der bisher zentral erbrachten Systemdienstleistungen im elektrischen Netz.

10.1.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

- **Hochschule für angewandte Wissenschaften Ostfalia**

Untersuchungen zur Regelung von Netzen und Kraftwerken werden an realen Anlagen, in numerischen Simulationen und im Labormaßstab erbracht. Hierzu stehen Hochspannungslabore für alle Spannungsformen sowie elektrische Netze im Labormaßstab zur Verfügung. Die Mitarbeit in nationalen Gremien (u. a. VDE, FNN, Cigre, DKE) dient dem Informationsaustausch.

An der Ostfalia steht ein industrielles Leitsystem mit Trainingssimulator von Netzsituationen zur Verfügung, mit dem stationäre und dynamische Vorgänge in Transport und Verteilnetzen untersucht werden. Diese erfolgen in Simulationsuntersuchungen sowie in durch Anbindung an Laboranlagen. Insbesondere die Einbindung von Speichern und die Auswirkungen von Elektromobilitäts-Flotten in elektrischen Versorgungsnetzen werden untersucht.

- **Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEH), LUH**

Das Fachgebiet Elektrische Energieversorgung des Instituts für Energieversorgung und Hochspannungstechnik an der Leibniz Universität Hannover beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem Einsatz von neuen Verfahren und Systemkomponenten in der elektrischen Energieversorgung, mit der Nutzung und Netzintegration regenerativer Energien sowie mit der Entwicklung und Optimierung von Modellen des Elektroenergiesystems für die Berechnung von stationären und dynamischen Betriebszuständen.

Forschungsschwerpunkte am Fachgebiet Elektrische Energieversorgung sind zurzeit:

- die Modellierung und die Simulation von Elektroenergiesystemen,
- dezentrale Erzeugungsanlagen, MicroGrids und Energiemanagementsysteme,
- die Netzintegration von EEG- und dezentralen Erzeugungsanlagen und insbesondere von Offshore-Windparks,
- die Simulation des europäischen Strommarkts Einsatz von supraleitenden Betriebsmitteln in der elektrischen Energieversorgung,
- Spannungsqualität und Netzurückwirkungen,
- vergleichende Untersuchung von Übertragungssystemen (HDÜ, HGÜ, Freileitung, Kabel, GIL-Systeme) und deren thermische Modellierung.

Das Fachgebiet Elektrische Energieversorgung des IEH verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Planung und beim Betrieb elektrischer

Energieversorgungsnetze. Umfassende Studien beinhalten Kurzschluss-, Leistungsfluss- und Stabilitätsuntersuchungen, Störungs- und Oberschwingungsanalysen sowie die Entwicklung von Strategien zum Energiemanagement und zur Vermeidung von Störungen und Netzurückwirkungen sowie Untersuchungen zum Einsatz und Betriebseigenschaften von supraleitenden Betriebsmitteln.

Das Systemverhalten der elektrischen Netze mit allen seinen Komponenten und Betriebsmitteln in allen Spannungsebenen wird im Wesentlichen simulativ untersucht. Hierfür stehen mathematische Modelle für die Untersuchung von stationären, dynamischen und transienten Vorgängen zur Verfügung, die weiter entwickelt und detailliert werden und an die neuen Herausforderungen der Stromnetze angepasst werden. Dabei werden im Hinblick auf die unterschiedlichen Betriebseigenschaften, das unterschiedliche Systemverhalten und die unterschiedlichen Aufgaben und Zielstellungen der Netzebenen angepasste und optimierte Modelle verwendet. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Regelung von Netzen und Kraftwerken an realen Anlagen, in numerischen Simulationen und im Labormaßstab erbracht. Die Mitarbeit in nationalen Gremien (u. a. VDE, FNN, Cigre, DKE) dient dem Informationsaustausch.

Das Fachgebiet Elektrische Energieversorgung ist Mitglied im Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN), im EFZN sowie bei ForWind, dem gemeinsamen Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Bremen und Hannover.

- **Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen (elenia), Technische Universität Braunschweig**

Innerhalb der Forschungsprojekte im Bereich Smart Grids untersucht das elenia die Möglichkeit Systemdienstleistungen zu erbringen, welche von dezentralen Energieerzeugungsanlagen (im Verbund) bereitgestellt werden können. Im Forschungsverbund Smart Nord und ENEFF werden am elenia technische und wirtschaftliche Aspekte untersucht. Vor allem die Bereitstellung von Blindleistung durch Anlagenverbünde und Speicher ist Untersuchungsgegenstand. Hierzu kann auf langjährige Erfahrungen im Bereich der Modellierung und Simulation von Stromnetzen sowie auf die Bilanzierung virtueller Kraftwerksverbünde (netzorientierter Verbundbetrieb, FEN) zurückgegriffen werden. In wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Zusammenhang werden die Voraussetzungen für den Energiemarkt und das Systemdesign der Zukunft untersucht.

Weiterhin betrachtet das elenia zukunftsfähige Konzepte zur intelligenten, nachhaltigen und effizienten Energienutzung in Häusern, Städten und Microgrids. Zudem wird eine Methodik entwickelt, die zur integrierten Simulation, Betriebsführung und Überwachung von Gebäuden, Anlagen und lokalen Infrastrukturnetzen genutzt werden soll (proaktives Netz- und Ressourcenplanung). Im Bereich der E-Mobility erforscht das elenia das uni- und bidirektionalen Laden sowie die Integration von Fahrzeugflotten in das Stromnetz aus netztechnischer und marktwirtschaftlicher Sicht.

Die Errichtung des Netzintegrationslabors (Wechselrichterlabor) dient dazu den Anschluss von PV-Anlagen und Lasten in Niederspannungsnetzen nachzubilden.

Das elenia ist Mitglied im VDE, Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN) und Smart Nord, sowie im Netzwerk Energieeffizienz (ENEFF), im EFZN, im Niedersächsischen Forschungsverbund Fahrzeugtechnik (NFF) und im Forum Netztechnik/ Netzführung (FNN) des VDE.

10.1.3 Forschungsbedarf

Auf folgenden Gebieten werden Aktivitäten als notwendig erachtet:

- Einbindung stationärer und mobiler Speicher zur Netzstützung in den unterschiedlichen Netzebenen, letztere mit der Zusatzfrage zur Nutzerakzeptanz. Dabei sind verschiedene Aufgabenstellungen und Zusatzfunktionen (z. B. Systemdienstleistungen) zu unterscheiden wie z. B. Regelleistungsbereitstellung, Spannungsregelung.
- Teilerdverkabelung von Freileitungsverbindungen sowie der Einsatz neuartiger Betriebsmittel (flexible AC transmission systems (FACTS), gasisolierte Leitung (GIL), Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), Hochtemperatursupraleitung (HTSLBM)).
- Potenzialausschöpfung durch vorhandene Einrichtungen zur Verbesserung von Netz-Regeleigenschaften bei Spannungs- und Frequenzhaltung.
- Verknüpfung der Erzeuger, Verbraucher und Speicher mit Kommunikationseinrichtungen (Smart Grid).
- Dezentrale Bereitstellung von Wirk-, Blind- und Kurzschlussleistung zur Frequenz- und Spannungshaltung sowie zur Gewährleistung eines sicheren Netzbetriebs.
- Sicherung einer notwendigen Versorgungsqualität (Oberschwingungen, Unterdrückung niederfrequenter Leistungsschwingungen, Flickerpegel, Kurzunterbrechungen).
- Last-, Speicher- und Erzeugungsmanagement inkl. Prognose- und Optimierungsverfahren und einer notwendigen Strommarktmodellierung.
- Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Speichern bei Beteiligung am Energiemarkt und Regelleistungsmarkt durch integrierte Strommarkt- und Stromnetzsimulationen. Hiermit können unter Berücksichtigung der zukünftigen Last-, EEG- und Kraftwerksentwicklung mögliche Einspeisebeschränkungen durch Netzengpässe, Netzausbaumaßnahmen aber auch Margen am Strommarkt bestimmt werden und die Energiespeicher hinsichtlich Leistung und Energieinhalt und weiterer technischer Eigenschaften ausgewählt bzw. optimiert werden.

10.1.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Die Optimierung der vorhandenen Betriebsmittel steht in einer ersten Phase der Entwicklung der Netze. Weitere Maßnahmen zur Ertüchtigung und zum Ausbau der Netze müssen folgen:

- Systemoptimierung durch „intelligente“ Last- und Erzeugersteuerung mit vorhandenen Einrichtungen (Energie- und Netzmanagementsysteme),
- Ertüchtigung von Betriebsmitteln (z. B. regelbare Transformatoren, Umrichtersysteme) zur Netzstabilisierung und Systemdienstleistungsbereitstellung,
- HGÜ-Messtechnik durch zertifizierte Messstellen (z. B. PTB): Grundlage für Technologie-Zulassung und Verbreitung,
- Entwicklung von Modellen und Simulationswerkzeugen zur Modellierung und numerischen Berechnung von ausgedehnten Energieversorgungssystemen unter Berücksichtigung von Einflüssen des Strommarkts,
- Abschätzung des Bedarfs an Netzausbau in den verschiedenen Spannungsebenen, des Bedarfs an konventioneller thermischer Mindesterzeugung, der möglichen Grenzen des Ausbaus von EEG-Erzeugung, des Bedarfs an Speichertechnologien, der zukünftigen Strompreisentwicklung usw.

10.1.5 Forschungstransfer

Kooperationen zur Untersuchung an Betriebsmitteln und Leitsystemen stellen den Transfer von Forschungsergebnissen her:

- Bei E.ON-Avacon kommt Bedienerunterstützung in Netzleitwarten zur Stabilisierung von Netzen bei hohen fluktuierenden Anteilen zum Einsatz. Diese wird unterstützt durch moderne Leittechnik mit Trainingssimulatoren.
- Regelbare Ortsnetztrafos (rONT) kommen bei der E.ON-Avacon in einem Pilotprojekt zum Einsatz.
- Innovative Ansätze in den Mittelspannungsnetzen werden auch von EWE, Oldenburg verfolgt.
- Informationstransfer durch Gremienarbeit und Einflussnahme auf Normungsprozesse.
- Beratung politischer Entscheidungsträger.
- Eine enge Zusammenarbeit mit regionalen (Verteilnetzbetreiber) und überregionalen (Übertragungsnetzbetreiber) Netzbetreibern lässt die Erkenntnisse direkt in den Transformationsprozess einfließen und kann betriebs- und volkswirtschaftliche Fehlinvestitionen vermeiden.
- Durch eine enge Zusammenarbeit und durch Technologietransfer mit Unternehmen (ABB, ENERCON, Siemens AG), die energietechnische Geräte/Anlagen anbieten, werden wissenschaftliche Erkenntnisse zu innovativen Produkten umgesetzt.

10.2 Wärme- und Kältenetze

10.2.1 Einleitung

Im Gegensatz zu den elektrischen Netzen und dem Gasnetz (und ggfs. einem neu zu errichtendem Wasserstoffnetz) sind Wärme- und Kältenetze dezentral angelegt. Sie dienen der Erwärmung oder der Kühlung von Gebäuden und der Bereitstellung

thermischer Energie in Industrieprozessen. Die zu transportierenden Medien in diesen Netzen verfügen über eine Temperaturdifferenz zur Umgebung, die den Transport wegen der unvermeidlichen Verluste über weite Strecken nicht sinnvoll erscheinen lassen. Die Ausprägung dieser Netze kann dennoch in größeren räumlichen Zusammenhängen (z. B. Fernwärmeversorgung von Städten) erfolgen und direkt an große Wärmekraftwerke angeschlossen sein. Antrieb ist die aus primärenergetischer Sicht höhere Ausnutzung durch die Koppelproduktion von Strom und Wärme. Das andere Extrem stellen die abgesetzten Netze in Gebäuden mit dem Heizungssystem in einem Einfamilienhaus bzw. der Versorgung mit Wärme und Kälte von Einzelgebäuden dar. Ebenso lassen sich bei Vorliegen bestimmter Rahmenbedingungen Nahwärmenetze betreiben. Klassisch werden all diese Netze mit fossilen Energieträgern über Umwandlung in Heizanlagen, Kälteanlagen oder in KWK- (Kraftwärmekopplung) bzw. KWKK-Anlagen (Kraftwärmekältekopplung) betrieben. Der fossile Energieeinsatz kann einfach über ein regeneratives System ersetzt werden. Beispiele sind Biomasseheizkraftwerke, Erdwärmekraftwerke mit Nahwärmenetz, Bioenergiedörfer mit Wärmeversorgung, Biogasanlagen mit dezentraler Wärmenutzung, Wärmepumpen, solar gestützte Heizsysteme und Absorptionskälteanlagen aus der Abwärme von BHKW.

Da etwa ein Drittel des deutschen Primärenergiebedarfes für Heizung und Warmwasser eingesetzt wird, darf in den globalen Betrachtungen über die Energiewende und den Speicherbedarf zukünftiger Energiesysteme die Anwendung und die Nutzung dieser Netze für Wärme und Kälte nicht außer Acht gelassen werden. Die bestehenden Netze und eventuelle Erweiterungen bieten gute Chancen sowohl Elektrizität kurzfristig einzuspeichern als auch umgewandelte Stoffströme (Power-to-Gas usw.) aufzunehmen. Ihre Betriebsweise kann darüber hinaus an die Anforderungen zukünftiger Energiesystem angepasst bzw. modifiziert (vermehrter Einsatz von BHKW, Wärmepumpen und Elektroheizungen) werden.

10.2.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Am 1. April 2000 startete das Projekt „Clausthaler Lehr- und Demonstrationsanlage für dezentrale regenerative Energieversorgungssysteme“ am CUTEC Institut unter Mitwirkung der TU Clausthal und der Stadtwerke Clausthal-Zellerfeld GmbH. Ziel war es, eine zu hundert Prozent aus erneuerbaren Energien bestehende Vollversorgung des CUTEC Instituts mit Strom und Wärme zu demonstrieren. Im Aufbau des „Energieparks Clausthal“ wurden eine Reihe von BHKW und thermischen Erzeugungseinheiten sowie Speicher und Wärmepumpe eingesetzt. Diese mussten an die bestehende Versorgung des Instituts angeschlossen werden. Im Betrieb des Energieparks erfolgten dann Optimierungen und Anpassungen zwischen den unterschiedlichen Erzeugungseinheiten (z. B. Solarkollektoren und Wärmepumpe) und den Anforderungen aus dem Institutsbetrieb.

In weiteren Projekten wurden innovative KWK-Konzepte im Kundenauftrag getestet. Insbesondere ging es um die Eignung dieser Technologien als virtuelle Kraftwerke, wobei die Wärmenutzung und -speicherung eine entscheidende Rolle spielte. Weitere Fragestellungen waren die Sicherstellung thermischer Anforderungen durch

die BHKW, die Speicherorganisation bei dynamischem elektrischem Lastmanagement und das Wärmemanagement im stromgeführten Betrieb.

Im Rahmen des FEN (Forschungsverbund Energie Niedersachsen) ist eine Klimakälteversorgung über Absorptionskältemaschinen mit einem BHKW gespeisten Warmwassernetz aufgebaut worden. Hier ging es u. a. um die Optimierung der Laufzeiten von BHKW im Einsatz für Heizung im Winter und Kühlung im Sommer.

Darüber hinaus wurden eine Reihe von Gutachten und Beratungen zur Wärmeversorgung unterschiedlicher Objekte (Industriegebiet Goslar, Hotels, Jugendherbergen, Mensa usw.) mit BHKW und erneuerbarer Energie durchgeführt.

10.2.3 Forschungsbedarf

Der Forschungsbedarf besteht weniger in der Entwicklung der verschiedenen Technologien und Anwendungen, sondern eher darin, Wärme- und Kältenetze mit anderen energetischen Anforderungen in einem innovativen Energiesystem sinnvoll zu vereinbaren. Die Netze stehen sozusagen am Ende der Energiewende, sie sind nicht Treiber, aber sie müssen dennoch funktionieren und sinnvoll betrieben werden können. Daher geht es in den meisten Fällen um Optimierung und Ausnutzung von Synergien.

In diesem Zusammenhang können folgende Fragestellungen auftreten:

- Optimierte Betriebsweise der thermischen Speicher in einem stromgeführten Betrieb mit BHKW (dezentral, autark oder im Verbundsystem),
- Aufnahme elektrischer Überschussenergie durch Speicher, Redispatch-Maßnahmen oder Wärmepumpen,
- Untersuchung neuartiger Speichermaterialien und –konzepte,
- Optimierung des Betriebsaufwands der Wärme-/Kältenetze in Bezug auf Verbrauch, Wartungskosten usw.
- Mögliche Kaskadennutzung der Wärmepotenziale auf unterschiedlichen Wärmeniveaus,
- Überprüfung der Eignung der Nah- und Fernwärmenetze für den Transport von regenerativer Prozesswärme.

10.2.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Die Innovationen werden hauptsächlich in der Systemtechnik gesehen. Die Kernkomponenten sind zum großen Teil verfügbar und bieten eher geringe Verbesserungspotenziale. Optimierungen an den Schnittstellen (technisch sowie auch organisatorisch) sind notwendig und bergen Innovationspotenziale für die Interaktion der Komponenten, der Software und der Betriebsweisen.

10.2.5 Forschungstransfer

Für innovative niedersächsische Unternehmen in der Heizungs- und Energieversorgung wie Stiebel-Eltron (Holzminden) oder Solvis (Braunschweig) ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten. Diese Firmen könnten mit einem Angebot an übergeordneten und vielfach einsetzbaren Systemen ihre Marktposition erweitern und ergänzen. Hinzu kommt die Möglichkeit, dass sich neue Dienstleistungsformen entwickeln lassen, die unter den veränderten Randbedingungen technisch und organisatorisch anspruchsvolle Umsetzungen verlangen. Der Transfer von Forschungsergebnissen findet Interesse bei den Betreibern von lokalen, regionalen sowie mediengebunden Netzen. Eventuell werden die Betreiber durch Forschungsergebnisse zu Veränderungen und Optimierungen motiviert.

10.3 Gasinfrastruktur

10.3.1 Einleitung

Anders als im elektrischen Bereich lassen sich die in der Gas-Infrastruktur enthaltenen Netze und Speicher nicht getrennt voneinander betrachten, da das Gas gleichzeitig Energietransport- als auch Speichermedium ist. Das durch Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Energie bereitgestellte Gas kann in die vorhandene Infrastruktur eingeleitet und dort in den gegenwärtigen und zukünftigen Nutzungspfaden vielfältig eingesetzt werden. Darüber hinaus sind die existierenden Anlagen und Prozesse für den Transport und die Verteilung sowie die Speicherung von Gas als Schnittstellen zu anderen Energienetzen zu betrachten. Diese können Energie in Form von Strom und Wärme bereitstellen oder verbrauchen und sind als bivalente Konzepte einsetzbar. Den daraus resultierenden Flexibilitätspotenzialen, Energieaufkommen und -bedarf über größere räumliche und zeitliche Distanzen hinweg ausgleichen zu können, kommt im Zusammenhang mit dem Ausgleichsbedarf im Stromsektor eine grundlegende Bedeutung zu. Gleichzeitig muss sich der Erdgassektor selbst eigenen technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Einspeisung biogener und synthetischer erneuerbarer Energiegase stellen. Bei der Verwirklichung eines europaweit funktionierenden Energiebinnenmarktes spielt Niedersachsen als Region mit hohen Transitströmen in Nord-Süd- sowie Ost-West-Richtung und der europaweit größten Dichte an Erdgas-Speicherkapazitäten eine zunehmend wichtige Rolle. Der starke Rückgang der niedersächsischen Eigenförderung ist dabei mit einer sukzessiven Umstellung bzw. Umrüstung weiter Bereiche des Erdgasnetzes und der Erdgasverbraucher verbunden, was jedoch auch Chancen im Aufbau einer von Niedersachsen ausgehenden, langfristig zukunftsicheren und kohlenstofffreien Wasserstoff-Infrastruktur bietet.

10.3.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Seit 2010 verfügt das Land Niedersachsen über den deutschlandweit einzigen universitären Lehrstuhl für den Bereich Gasversorgungssysteme, der am Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) angesiedelt ist. Als interessenunabhängige wissenschaftliche Instanz leistet dieser einen wichtigen Beitrag bei der Gestaltung des künftigen Erdgas-Energiesystems.

Derzeitige Arbeitsfelder und Aktivitäten sind die technologische, wirtschaftliche und rechtlich/regulatorische Bewertung von Erdgasnetzen, die Integration erneuerbarer Energien im Gasnetzbetrieb und das Zusammenspiel von Energienetzen. Besonders Methoden zur Modellierung für Simulation und Optimierung von Gasnetzen sind Gegenstand der Forschungsarbeit.

In folgenden Themenbereichen wurden Projekte abgeschlossen:

- Standortoptimierung von Power-to-Gas-Anlagen,
- Bewertung der Netzleistungsfähigkeit von Gasnetzen,
- Risikoanalyse eines Fernleitungsnetzes im Rahmen der Schwachstellenanalyse nach EnWG,
- Machbarkeitsstudie für ein Rohbiogas-Sammelleitungssystem,
- Entscheidungskonzept zur Sicherstellung der Versorgung in den L-Gas-Gebieten im Rahmen der deutschen Netzentwicklungsplanung.

Neben den Bereichen Versorgungssicherheit, Integrität und Zuverlässigkeit der Gas-Infrastruktur unter den Rahmenbedingungen der Liberalisierung, intensiven Regulierung und Veränderung von Gasaufkommen und -verbrauch ist die Systemanalyse auf die Bewertung von Unsicherheiten und Risiken bei der Energiewende ausgerichtet. Insbesondere die Identifikation technischer und wirtschaftlicher Lösungen für die Integration erneuerbarer Energien steht hierbei im Fokus. Die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls für Gasversorgungssysteme sind zurzeit:

- Integrierte Betrachtung von Energiesystemen durch Co-Simulation, das Ziel ist dabei die Weiterentwicklung von Modellen, Methoden und Verfahren zur Netzbetreiber-übergreifenden mehrjährigen Simulation und Analyse des deutschen Gastransportsystems in räumlich und zeitlich detaillierter Auflösung.
- Demand-Side-Management-Potenziale der Erdgas-Infrastruktur, durch gezielte Steuerung der Betriebszeiten von elektrisch angetriebenen Verdichtern kann das Erdgasnetz als „Druckgasspeicher“ für die temporären Erzeugungsüberschüsse erneuerbarer Energien genutzt werden.
- Fortführung der Umstellungsstrategie für die Sicherheit der Versorgung in den L-Gas Gebieten, die Förderung und der Transport von Erdgas in Niedersachsen ist hier betroffen.
- Methodische Weiterentwicklungen in Simulation und Optimierung in Kooperationen mit Fraunhofer-Gesellschaft (FhG), Detaillierung eines deutschen und perspektivische Entwicklung eines europäischen Gasnetzsimulators.

- Bewirtschaftung von Transportnetzen mit dem Ziel einer möglichst einheitlichen technisch-physikalischen Modellierung von (Netz)Kapazitäten
- Betrachtung der Gastransportsysteme in Deutschland und Europa, Abstimmung und/oder Optimierung der Schnittstellen an Länder- oder Eigentumsgrenzen.
- Technische Sicherheit auf den verschiedenen Ebenen der Zuverlässigkeitsanalyse für Netze und Element; die langfristige und strategische Sicherstellung der Ressourcenverfügbarkeit und der Entwicklung von Gasangebot und –nachfrage in Deutschland und Europa; Anpassung der Speicher- und Transportkapazitäten.

Ergänzende Forschungsfelder sind in den Grundlagen

- Erdgastransport und -verteilung, Betrieb und Führung von Gasversorgungsnetzen,
- Dispatching und Logistik,
- Ausgestaltung und Auswirkungen der gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben (Berücksichtigung der Versorgungsqualität, Investitionsbedingungen),
- Optimierung von Wartung/Instandhaltung/Rehabilitation/Ersatz bestehender Anlagen.

angelegt.

Die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Gasversorgungssysteme arbeiten durch die Nähe zur TU Clausthal (zugleich) am EFZN, beteiligen sich vor Ort an der Vorbereitung und Beantragung von Forschungsvorhaben und Realisierung von Projekten. Weiterhin ist der Lehrstuhl Mitglied im DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs und in den dortigen Projektkreisen zur technischen Sicherheit (Bewertung des Regelwerks), Qualität in der Gasversorgung (Netzleistungsfähigkeit) sowie im Forschungsbeirat Gas tätig. Weitere Aktivitäten sind das Advisory Committee der Pipeline Technology Conference (größte Fachkonferenz in Deutschland mit internationaler Sichtbarkeit), der Wissenschaftliche Beirat der Fachzeitschrift EnWZ – Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft des Verlags C.H. Beck und Mitherausgabe der Fachzeitschrift GWF – Gas- und Wasserfach Gas/Erdgas des Deutschen Industrieverlags, vormals Oldenbourg Industrieverlag.

10.3.3 Forschungsbedarf

Wertbeiträge von Forschungsarbeiten im Bereich der Gasnetze für das Land Niedersachsen sind vor allem in folgenden Bereichen zu erwarten

- Strategien und Maßnahmen zur Gewährleistung einer volkswirtschaftlich kostenoptimalen Versorgungssicherheit beim Ausbau der Erdgasinfrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der gasbasierten Stromerzeugung,
- Auswirkung von schwankenden Erdgasqualitäten auf die Erdgas-Infrastruktur und Erdgasverbraucher,

- Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur, auch unter Verwendung bestehender Erdgasleitungen und –speicher,
- Technische Sicherheit von Erdgasleitungen und Erdgasspeichern,
- Gesellschaftliche Akzeptanz und Umweltverträglichkeit der Erdgas-Infrastruktur,
- Beitrag der Erdgasinfrastruktur zur energienetz- und energieträger-übergreifenden Optimierung einer umweltfreundlichen Energieversorgung.

Diese Forschungsarbeiten sollten im Rahmen mehrerer Dissertationen erfolgen. Es wird zusätzliche personelle Unterstützungen benötigt, um die vorhandene Infrastruktur der Hochschulen effektiv nutzen zu können.

10.3.4 Innovations- und Technologiepotenziale

Innovationspotenziale bestehen vor allem in der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette von Herstellung, Transport und Speicherung bis zur Verwendung. Dabei besteht auch aufgrund der Tatsache, dass dieser Bereich in vorherigen Überlegungen nur eine sehr eingeschränkte Rolle spielte, gegenüber anderen deutschen Wirtschaftsregionen ein gewisser Nachholbedarf bei der Förderung nicht nur von Forschung und Innovationen, sondern auch von Unternehmensgründung und Entwicklung kleiner und mittelständischer Unternehmen. Dabei kann sich das Land Niedersachsen auf eine vielfältige und wettbewerbsfähige Unternehmenslandschaft in der erdgasbasierten Energieversorgung stützen.

10.3.5 Forschungstransfer

Der bestehende Wissenstransfer zwischen Wissenschaft, Unternehmen und öffentlichen Institutionen kann durch eine Verstetigung der niedersächsischen Kompetenzen im Forschungsbereich Gasnetze erheblich an Innovationskraft gewinnen. Hier ist insbesondere ein Ungleichgewicht mit den benachbarten Niederlanden zu konstatieren, wo der volkswirtschaftliche Nutzen spezifisch gasnetzorientierter Forschungsarbeiten und Veranstaltungsreihen erkannt worden ist und in Kooperationen mit Unternehmen in erheblichem Umfang politisch und finanziell gefördert wird.

11 Informations- und Kommunikationstechnik IKT

11.1 Einleitung

Mit dem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) wird eine ganzheitliche dynamische Optimierung des Energieversorgungssystems angestrebt. Ein großes Forschungs- und Entwicklungspotenzial liegt im Bereich der flächendeckenden Überwachung und feinstufigen Steuerung des Speichereinsatzes und speicherfunktionaler Lastausgleiche mit Hilfe von IKT-Infrastrukturen unter Echtzeitanforderungen. Die Handlungsfähigkeit eines dezentralen Energiemanagementsystems wird maßgeblich durch die Güte der Informationen bestimmt, die es als Eingangsgrößen – beispielsweise zur Optimierung von benötigter Speicherkapazität einer Batterie oder der dynamischen Entlastung durch Eigenstromerzeugung – erhält. In einem rechnergestützten Energiemanagement sind durch den Betrieb von Messstellen entsprechende Energieangebots- und Energiebedarfszeitreihen zu erfassen, zu prognostizieren und zu kommunizieren, so dass notwendige Ein- und Ausspeichervorgänge möglichst verlustfrei und kostenoptimal auszugestalten sind. Bei der Gestaltung des Steuerungssystems kommt der Inanspruchnahme von Speicherkapazitäten unterschiedlicher Zeitskalen eine besondere Bedeutung zu. Hierbei sind neben dem Aspekt der Wirkleistungsbereitstellung auch Aspekte von Systemdienstleistungen für den Netzbetrieb wie der Spannungsbandregelung oder der Frequenzregelung zu berücksichtigen.

11.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Niedersächsische Forschungseinrichtungen arbeiten mit unterschiedlicher Ausrichtung im Themengebiet der IKT. Nachfolgend sind die Schwerpunkte der jeweiligen Forschungseinrichtung kurz dargestellt.

- **OFFIS, Oldenburg**

Hier werden nur einige ausgewählte Forschungsarbeiten in Verbundprojekten aufgeführt:

- 2006 bis 2009: Im Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN) wurden dezentrale Energiesysteme entwickelt, die in Verbindung mit moderner Energieinformatik Stromverteilnetze entlasten, Verluste minimieren und durch netzorientierten Betrieb die Effizienz der Energiewandlung erhöhen.
- 2012 bis laufend: Darauf aufbauend startete in 2012 der Forschungsverbund Intelligente Netze Norddeutschland (SmartNord) mit der Erstellung von Beiträgen zur Erschließung der Potenziale aktiver Komponenten in den elektrischen Netzen der Nieder- bis Hochspannungsebene für die Erbringung von Systemdienstleistungen für das Verbundnetz. Mit einer neuen und sämtliche Komponenten einbeziehenden IKT-Infrastruktur sollen in einem zukunftsfähigen Stromversorgungssystem Wirkleistung, Regelleistung und Blindleistung dezentral in den Verteilnetzen bereitgestellt werden.
- 2008 bis 2012: In der E-Energy-Modellregion eTelligenz untersuchte OFFIS mögliche Geschäftsprozesse und Anwendungsfälle rund um einen regionalen

Marktplatz und das Konzept virtueller Kraftwerke. OFFIS bildete die IT-Kommunikation für die Geschäftsprozesse von der Marktebene bis zur technischen Anlagenebene auf Basis internationaler Standards ab und entwickelte eine technologieunabhängige Referenzarchitektur.

- 2009 bis 2011: Im Elektromobilitätsprojekt GridSurfer wurden Elektrofahrzeuge, Speicher- und Ladestationen, eine Batteriewechselstation, Mess- und Steuersysteme in einem Feldversuch erprobt. Eine effektive Nutzung der Synergieeffekte zwischen dem Mobilitäts- und Energiesektor ist dabei nur durch ein intelligentes übergeordnetes Netzmanagement möglich. OFFIS brachte umfangreiche Kenntnisse im Bereich Systemsimulation ein und erweiterte im Rahmen von GridSurfer eine Simulationsplattform für die Untersuchung von Energiesystemen, die in der Lage ist, mehrere heterogene Simulationssysteme zu koppeln.

- **NEXT ENERGY, Oldenburg**

NEXT ENERGY arbeitet und forscht an der Einbindung und messtechnischen Erfassung von Systemkomponenten ins elektrische Netz und der Vermessung von Verbrauchern und Systemen. Dies betrifft die Planung und Anbindung elektrischer Speicher in ein Energieversorgungssystem.

- Dies erfolgt z. B. in einer Batteriewechselstation für Netzdienstleistung und für die Einbindung in die Elektromobilität.
- Durch die Vermessung von Verbrauchsdaten von Einzelhaushalten mit Mikro KWK Systemen wird die Wirkung auf die Energieeffizienz und Entwicklung von zukünftigen Netzauswirkungen neuer Gerätetechnologien erprobt und Aussagen für die Zukunft getroffen.

- **Institut für Wirtschaftsinformatik, LUH**

Im Forschungsschwerpunkt „Erneuerbare Energien und neue Mobilität“ des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Leibniz Universität Hannover (LUH-IWI) wird seit Jahren technoökonomisch u. a.

- an der Lastbalancierung durch Preissignale für Stromversorger (insb. Verbraucherverhaltensmodellierung mit Künstlichen Neuronalen Netzen) und Steuerung dezentraler Heizkraftwerke in virtuellen Blockheizkraftwerken (insb. Simulationsumgebungen), vgl. das bundesgeförderte Projekt E-Energy/SmartWatts und das landesgeförderte Projekt Smart-Nord,
- an dem Ersatz fossiler Kraftstoffe durch EE-Kraftstoffe, z. B. durch Elektro- oder Wasserstoffmobilität (insb. deren Erzeugung aus Stromüberschüssen), informelle Kooperation mit Volkswagen (Wolfsburg, Hannover) und Volkswagen FS (Braunschweig), und
- an Finanzierungs-, Risikomanagement-, Wirtschaftlichkeits- und Akzeptanzproblemen von EE-Anlagen (Erzeugung, Speicherung, Transport), informelle Kooperation mit der NORD/LB (Hannover),

geforscht. Technische, betriebs- und volkswirtschaftliche sowie gesellschaftliche Fragen und Probleme werden dabei oft integriert betrachtet. Verschiedene Künstliche Neuronale Netze werden dabei mit dem institutseigenen Neurosimulator FAUN trainiert, Wirtschaftlichkeits- und Szenarioanalysen werden oft auf Basis von Excel/VBA erstellt und Simulationen mit Java/Ruby Simulationstools durchgeführt (Eigenentwicklungen, zum Teil basierend auf am Markt verfügbarer Standard- und Open-Source-Software).

- **Institut für Informatik, TUC**

Am Institut für Informatik der TU Clausthal wird u. a. auf den Gebieten Elektromobilität und energiesparender Automobilelektronik gearbeitet. Im Leuchtturmprojekt „TUCar“ wird ein voll auf Computern basierendes Elektrofahrzeug gebaut. In Planung ist das NTHCar, ein alltagstaugliches Stadtfahrzeug auf Elektrobasis.

11.3 Forschungsbedarf

- **OFFIS**

Verteilnetzstudien und Szenarioanalysen

Bereits heute werden diverse regional oder funktional zusammenhängende Erzeuger, Speicher und große Verbraucher informationstechnisch gebündelt. Intelligente Softwaresysteme sollen künftig solche Anlagenverbünde in die Lage versetzen, unter Beachtung der Entwicklung von Strom- und Gasmärkten und möglichen Betriebsmittelengpässen der Netze den jeweils günstigsten Fahrplan der Komponenten für das Gesamtsystem aufzustellen.

Mit Hilfe von dynamischen Simulationsstudien und Szenarioanalysen ist ein besseres Verständnis des systemischen Zusammenhangs der Netzintegration erneuerbarer Energien sowie der damit verbundenen Notwendigkeit der Schaffung von Speicherkapazitäten mit unterschiedlichen Anforderungen aufzubauen – vom Ausgleich kurzfristiger Fluktuationen bis hin zur Langzeitspeicherung. Anhand von Einspeise- und Entnahmezeitreihen kann eine Analyse der Wirkleistungsbilanzen dazu beitragen, den Bedarf an zusätzlichen gesicherten Erzeugungskapazitäten, notwendigen Speicherkapazitäten und Netzausbau zu erkennen. Es muss eine kombinierte Betrachtung von IKT-basierten Kontrollansätzen für elektrische Verbraucher und Erzeuger sowie von Speichern auf die gewünschten Effekte in Energieversorgungsnetzen unternommen werden – letztlich auch ganzheitlich im Sinne einer spartenübergreifenden Sichtweise im Bereich der Systemanalysen und Energiesystemplanung. Angefangen von der Energiegewinnung, der Übertragung und Speicherung bis hin zum Verbrauch gibt es interessante Wechselwirkungen zwischen der Versorgung der Verbraucher mit fossilen Energieträgern wie Gas und Mineralölprodukten und der elektrischen Energieversorgung. Beim Auftreten von

Überschuss- oder Defizitleistung bei der elektrischen Energieversorgung, gerade bei erheblichen Dauern und damit Energieinhalten, gilt es beispielsweise auch die Speicherfunktionalität des Gasversorgungssystems in Verbindung mit dem elektrischen Energieversorgungssystem in der Gesamtsicht näher zu untersuchen.

Die Forschungsziele im Bereich der Planung und Analyse lassen sich auszugsweise wie folgt darstellen:

- Entwicklung von (Hybrid-)Netzsimulationsmodellen zur Szenarienanalyse künftiger Verteilnetze unter Anwendung von CIM-Standards für den Datenaustausch zwischen Simulationskomponenten (CIM for Dynamics)
- Einsatzanalysen für einzelne Technologielinien und forschungsbegleitende Systemanalysen bzw. Entwicklung von Konzepten einer nachhaltigen Energieversorgung auf der Basis von dynamischen Simulationsstudien

Bilanzkreisoptimierung und Supply-Demand-Matching

Ein intelligentes Energiemanagement setzt auf der Einspeise- wie auch auf der Entnahmeseite an. Dem Anstieg des Regelleistungsbedarfs durch Kurz- und Langzeitspeicherung beispielsweise in großangelegten Pumpspeicher- und Druckluftspeicherkraftwerken entgegenzutreten erfordert in Anbetracht weniger jährlicher Nutzungsstunden im Mittel einen hohen Kapitaleinsatz. Deutlich weniger kapitalintensiv kann die Nutzung von Flexibilität auf der Nachfrageseite sowohl in Privathaushalten als auch in Gewerbe- und Industriebetrieben sein, insbesondere wenn diese aus dem gegenwärtigen Anlagen- und Gerätebestand heraus vermarktet werden kann. Als übergeordnetes Thema sind darum speicherfunktionale IKT-gestützte Maßnahmen im Zuge von Lastmanagement interessant, welche in der Diskussion um Speichertechnologien auch als virtuelle Speicherpotenziale verstanden werden. Leistungsanpassungen auf der Verbrauchsseite setzen jedoch zwingend eine IKT-Anbindung beispielsweise von Haushaltsgeräten im intelligenten Heimnetzwerk oder Produktionsanlagen im Industrienetzwerk voraus. Ein weiterreichender Forschungsbedarf liegt hier vor allem in der Anwendungs- und Geschäftsfallentwicklung, so dass Kostenvorteile für Privathaushalte sowie Gewerbe- und Industrieunternehmen gegeben sind, die sich aktiv am Ausbalancieren von Erzeugung und Last beteiligen. Zudem sind möglichen Komforteinbußen und etwaigen Ablaufstörungen in Gewerbe- und Industrieunternehmen vorzubeugen. Dafür ist eine Weiterentwicklung von Management-, Kommunikations- und Steuerungssystemen für verteilte Stromspeicher oder verteilte Stromabnehmer mit Potenzial zum Lastausgleich erforderlich.

Für den Betrieb intelligenter Energiesysteme der Zukunft ergeben sich zum Beispiel folgende Forschungsziele, die mit einer Entwicklung sowohl markt- als auch netzorientierter Lösungen einhergehen:

- Entwicklung und Erprobung von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Vernetzung von Netzbetriebsmitteln sowie Erzeugungs- und Verbrauchsstellen für ein integriertes Erzeugungs-, Speicher- und Lastmanagement.
- Entwicklung von Steuerungs- und Automatisierungsanwendungen für eine aktive Lastverteilung und -neuordnung im Betrieb von Verteilnetzen zur Reduktion des Bedarfs an elektrischer Speicherkapazität und Etablierung dezentraler aggregierter Subsysteme.

- **NEXT ENERGY, Oldenburg**

Internationale Standards, Verhaltensregeln und die Einführung von Empfehlungen für Messaufbauten (engl.: Regulation, Codes and Standards, RCS) sind die Voraussetzung zur erfolgreichen Verbreitung neuer Energietechnologien, da sie die Austauschbarkeit und Vergleichbarkeit von Komponenten sicherstellen. Folgende Projektvorschläge würden für eine bessere Austauschbarkeit und Vergleichbarkeit von Komponenten und Messwerten bei der Energieerzeugung, bei der Speicherung, beim Transport und beim Verbrauch sowie eine bessere Steuerbarkeit und Handhabbarkeit von dezentralen Energiesystemen sorgen:

- Definition einheitlicher Terminologien und Methoden zur Beschreibung von Systemkomponenten und deren Eigenschaften sowie
- die Normierung von Messmethoden durch Standards und Empfehlungen.
- Definition einheitlicher Energiespeicher für Kleinverbraucher,
- Definition einheitlicher Kommunikationsschnittstellen entlang der gesamten Netztopologie, d. h. vom Erzeugung bis zum Verbraucher,
- Steuerung und Regelung von dezentralen Energiesystemen durch Schwarmspeicher und Schwarmssysteme zur Sicherstellung einer stabilen Versorgung,
- auch unter der Randbedingung hoher Fluktuationen in der Erzeugung und beim Verbrauch.

- **Institut für Wirtschaftsinformatik, LUH**

Forschungsziele ergeben sich in folgenden Themenbereichen:

- Entwicklung von Steuerungs- und Automatisierungsanwendungen für eine aktive Lastverteilung und -neuordnung im Betrieb von Verteilnetzen zur Reduktion des Bedarfs an elektrischer Speicherkapazität.
- Entwicklung von Analysemethoden und -werkzeugen zur Erkennung von Investitions- und Handlungsbedarfen durch stationäre und dynamische Lastflussberechnung mit Positionsbestimmung für multifunktionale Netzspeicherkomponenten.
- Entwurf von lokalen Regelungskonzepten für aktiven Verteilnetzbetrieb mit Nutzung von Lastmanagementansätzen und verteilten Speicheranlagensystemen.
- **Institut für Informatik, TUC**

Forschungsansätze werden hier in folgenden Themengebieten gesehen:

- Cloud Computing zur Simulation von Autobatterien,
- Kopplung großer Produktionsanlagen über ein AMS mit den Energieversorgern,
- Rechnernetzprotokolle und Schedulingverfahren zur Virtualisierung städtischer Blockheizkraftwerke zur Fernwärmeversorgung,
- Online-Erfassung der GPS-Position von mobilen Elektrofahrzeugen und Weiterleitung an die Energieerzeuger über UMTS und LTE,
- Modernisierung der IT-Infrastruktur in bestehenden Energiespeichern und -systemen,
- Kopplung von Smart Phones mit Smart Appliances sowie von Smart Homes mit Smart Meters,
- Smart Phone Apps zur energieoptimierten Routenplanung für Spediteure, Autoverleiher und Taxiunternehmer.

11.4 Innovations- und Technologiepotenzial

- **OFFIS**

Intelligente Netze eröffnen die Möglichkeit der kompletten Nutzung des Potenzials der verschiedenen Energieformen und eine Beherrschung zunehmend dezentraler und volatiler Erzeugungsstrukturen. Für die Erbringung von Systemdienstleistungen sind im Energiesektor IKT-Systeme von der Feldgeräte- bis zur Leitstandsebene nicht mehr wegzudenken. Eine weitere Entwicklung von Simulations- und Planungstools ist dringend erforderlich, um den Stromnetz- und Speicherausbau, eine Steigerung der Nutzung regenerativer Energieanlagen und den Einsatz von IKT-Systemen dabei, letztlich auch unter Kostengesichtspunkten, effektiv realisieren zu können. Für die Betriebsführung in Stromnetzen muss eine Integration vom Management des Speichereinsatzes sowie dem Management von Lastausgleichsmaßnahmen erfolgen.

Grundsätzlich können regenerative Energieanlagen mit zunehmendem Anteil nicht mehr in einer abgeschirmten Nische unter dem Erneuerbare-Energien-Gesetz betrieben werden. Vielmehr wird eine Integration der dezentralen Energieanlagen nicht allein in die Netze, sondern auch in die Märkte erforderlich. Mit Blick auf die Entwicklung an den Energiemärkten wird auch die Beeinflussung der Nachfrageseite durch Maßnahmen der Energieeffizienz und des Lastmanagements ein zunehmend wichtiger Faktor. In einem IKT-basierten Energiesystem können unter hoher Nutzungsdauer möglichst weniger Speichersystemen erzeugungs-seitige Prognosen und Fahrpläne mit elektrischen und thermischen Verbraucherlastgängen abgestimmt werden.

- **NEXT ENERGY, Oldenburg**

Durch abgestimmte Messtechniken und etablierte Verfahren werden aufwendige Eigenentwicklungen in der Industrie vermieden und Vorteile für die eigene Produktentwicklung erreicht, da eine bessere Abschätzung des firmeninternen Kenntnisstandes im Vergleich zur Konkurrenz erfolgen kann. Ferner erlaubt eine einfache Austauschbarkeit von Komponenten den störungsfreien Verkauf eigener Produkte durch „second source“-Zulieferer und ermöglicht in vielen Bereichen erst eine breite Kommerzialisierung. Wie man am Beispiel des Autoakkus in Elektromobilen sehen kann, hängt zudem die Vermarktung von Anwenderenergiespeichern auch von der einfachen und aktiven Integration in das Verteilnetz ab, die eine Energierückspeisung mit einschließt. Deswegen haben Standards insbesondere für KMU, die nicht Marktführer sind, eine hohe Bedeutung für die Wirtschaft.

- **Institut für Wirtschaftsinformatik, LUH**

Auch die Beeinflussung oder Steuerung der Nachfrageseite durch Maßnahmen der Energieeffizienz und des Lastmanagements wird ein zunehmend wichtiger Faktor mit Blick auf die Entwicklung an den Energiemärkten. In einer Mittlerrolle stehen in einer Welt der intelligenten Energielogistik Verbundkoordinatoren von dezentralen Energieanlagen, aber auch Messstellenbetreiber, welche Energiedienstleistungen wie zum Beispiel die Aggregation von Anlagen erbringen und die Erfassung und Übermittlung von Energiedaten übernehmen

- **Institut für Informatik, TUC**

Durch frühzeitige Einbindung von IKT-Experten bei der Planung neuer Energiespeicher und -systeme entsteht ein hohes Innovations- und Technologiepotenzial, sowie neue Geschäftsfelder für die Wirtschaft aufgrund von notwendigen Dienstleistungen, Hard- und Software. Derselbe Effekt wird auch durch die Modernisierung von IT-Infrastruktur in bestehenden Energiespeichern und -systemen erzielt. Weiterhin erlaubt die Vernetzung von Verbrauchern wie

Elektrofahrzeugen, Kühlschränken usw. mit einem Verbrauchszähler und einem Smart Phone sowie mit lokalen Sensoren, ein „Internet der Energie“ aufzubauen, dass das zukünftige „Internet der Dinge“ als Kommunikationsinfrastruktur nützen kann. Schließlich wären der Kauf und Verkauf von Rückspeiseleistung im Sekundentakt durch einen Hochfrequenzhandel an der Strombörse und der Verkauf von anonymisierten Fahrzeugnutzungsprofilen technisch möglich und profitabel.

11.5 Forschungstransfer

- **OFFIS, Oldenburg**

Die Zusammenarbeit mit Betreibern von Übertragungs- und Verteilnetzen bis hin zu Systemintegratoren erscheint im IKT-Bereich unverzichtbar. Zu den wichtigsten Transferpartnern zählen hier die EWE AG, EWE Netz GmbH mit Sitz in Oldenburg, die E.On AG mit regionalen Gesellschaften und darüber hinaus zahlreiche Stadtwerkebetriebe. Die Entwicklung von Steuerungs- und Automatisierungsanwendungen für aktiven Verteilnetzbetrieb kann im Praxisbezug zu Anbietern von Leit- und Schutztechnikkomponenten wie zum Beispiel der Siemens AG und regionalen Vertriebsniederlassungen erfolgen. Von besonderer Bedeutung sind im Bereich der Verteilnetzautomation auch die Standardisierungs- und Normungsarbeiten auf nationaler und internationaler Ebene. Für eine Weiterentwicklung des IKT-Einsatzes im permanenten Messstellenbetrieb, der Überwachung des Leistungs- und Energieflusses, aber auch zur Durchführung von Schaltvorgängen im Netz ist ein Forschungstransfer zur Deutschen Kommission Elektrotechnik/Elektronik/Informationstechnik (DKE) im DIN und VDE unerlässlich. Szenarioanalysen und Simulationsstudien liefern zudem wichtige Aufschlüsse über zukunftssträchtige Technologieentwicklungen, lassen regulatorische Handlungsempfehlungen ableiten und helfen bei der Bestimmung von Förderbedarfen. Außerdem ist auch ein Forschungstransfer mit Stromvertriebsgesellschaften wie der EWE AG, EWE Vertrieb GmbH mit Sitz in Oldenburg sowie E.On Vertrieb Deutschland GmbH und ihren regionalen Gesellschaften wichtig. Es ist vielversprechend, die Flexibilität auf der Verbrauchsseite ins Optimierungskalkül des Vertriebshandels einzubeziehen und auch Großabnehmer zur Senkung der Beschaffungskosten aktiv einzubinden. Des Weiteren ist als Softwareanbieter im Bereich des Portfoliomanagements und des Managements der Beziehungen zu Stromkunden die BTC AG mit Sitz in Oldenburg zu nennen.

- **NEXT ENERGY, Oldenburg**

In Oldenburg findet eine begleitende Entwicklung von internationalen Regeln zur

Kommunikation von Geräten und Systemen statt. Durch die Mitwirkung in der Deutschen Kommission Elektrotechnik/Elektronik/Informationstechnik (DKE), eine gemeinsame Einrichtung des Deutsches Institut für Normung (DIN) und des Verbandes der Elektrotechnik/Elektronik/Informationstechnik (VDE) sorgt für eine industrielle Verwertung von Forschungsergebnissen durch die Veröffentlichung und den Vertrieb von Normen und Standards. Die Angewandte Informationstechnik und NEXT ENERGY versuchen, ihren Teil dazu beizutragen.

- **Institut für Wirtschaftsinformatik, LUH**

Energiehandelshäuser und letztlich Stromvertriebsgesellschaften können von schwankenden Marktpreisen profitieren, wenn sie zur Downstream-Vermarktung erneuerbarer Energien ein Absatzportfolio besitzen, das flexiblen Nachfragepositionen enthält. Zur Einbindung von Endverbrauchern mit der Möglichkeit auf der Grundlage von Speicher- und Lastmanagementkonzepten deren Energienachfrage beeinflussen oder gar kontrollieren zu können werden neuartige Geschäftsmodelle und IKT-Plattformen benötigt. Folgende Unternehmen sind unter anderen als mögliche Partner für einen Forschungstransfer zu sehen:

- EHA Energie-Handels-Gesellschaft mbH & Co. KG
- Entelios AG
- EWE AG, EWE Vertrieb GmbH
- PSI Energy Markets Hannover
- Vattenfall Europe AG, Vattenfall Europe Sales GmbH

Die Entwicklung von Steuerungs- und Automatisierungsanwendungen für aktiven Verteilnetzbetrieb kann im Praxisbezug zu Anbietern von Leit- und Schutztechnikkomponenten, Betreibern von Übertragungs- und Verteilnetzen bis hin zu Systemintegratoren erfolgen. Mögliche Transferpartner sind hier:

- BTC AG
- EWE AG, EWE Netz GmbH

- **Institut für Informatik, TUC**

Es findet ein Forschungstransfer zu Firmen in Niedersachsen als kommerzielle Verwerter statt.

12 Leistungselektronik

12.1 Einleitung

Die Leistungselektronik ermöglicht die verlustarme Umformung elektrischer Energie und gleichzeitig die exakte und hochdynamische Steuerung und Regelung von Strömen und Spannungen. Damit ist die Leistungselektronik eine Schlüsseltechnologie für neue Energiesysteme, einschließlich der Speicher.

Zur Speicherung elektrischer Energie findet immer zuerst eine Umformung mit Hilfe der Leistungselektronik statt, z. B. ist für die Elektrolyse eine Gleichrichtung nötig. Der Prozess wird über die Regelung der Ströme mit Hilfe der Leistungselektronik geführt und optimiert. Das betrifft alle elektrischen und elektrochemischen Speichersysteme wie Batterien, Brennstoffzellen und die Elektrolyse, aber auch Pump-, Druckluft- und Schwungmassenspeicher, deren Motoren/Generatoren ebenfalls leistungselektronisch geregelt werden.

Außerdem werden fast alle Windkraftanlagen und alle PV-Anlagen über Leistungselektronik ans Netz angebunden. Hinzu kommen leistungselektronische Einrichtungen im Netz selbst, z. B. zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ), Anbindung von Offshore-Windparks ans Netz oder statische Kompensationsanlagen für Blindleistung und aktive Netzfilter.

Die Leistungselektronik ermöglicht also erst die Energiewende; diese wird zu einem weiteren starken Anstieg des Marktes für leistungselektronische Geräte und Systeme führen. Die damit anwachsende Vielfalt der Anwendungen stellt auch die Leistungselektronik einschließlich der damit eng verknüpften Regelungstechnik leistungselektronischer Systeme vor neue Herausforderungen.

12.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Mehrere niedersächsische Hochschulen arbeiten auf dem Gebiet der Leistungselektronik (Leibniz Universität Hannover, TU Clausthal, TU Braunschweig, Hochschule Hannover). Vielfältige Beiträge zur Anbindung von Energiespeichern ans Netz wurden bereits an der TU Clausthal (Batteriespeicher), LUH (Batteriespeicher), und TU Braunschweig (Schwungmassenspeicher) geleistet, unter anderem im Verbundprojekt FEN sowie (neu) in SmartNord.

Das hohe Niveau dieser Forschungsaktivitäten an der LUH wurde u. a. durch das Forschungsrating des Wissenschaftsrates bestätigt. Seit kurzer Zeit existiert an der Leibniz Universität Hannover zudem eine Forschungsgruppe zur Leistungselektronik des Fraunhofer IWES unter Leitung von Prof. Mertens.

Die Kompetenzen der Forschungslandschaft in Niedersachsen reichen dabei von der Einsatztechnik der Leistungshalbleiter über die Schaltungstopologien und ihre Steuerung bis hin zur Regelung von Motoren/Generatoren, Batterien, Brennstoffzellensystemen und Netzen. Die große Bandbreite des entsprechenden Know-How sowohl in technologischer als auch in anwendungstechnischer Sicht

kann von einem Institut allein nicht bewältigt werden und macht eine Arbeitsteilung zwischen mehreren Universitäten und Hochschulen erforderlich.

12.3 Forschungsbedarf

Der Forschungsbedarf in Bezug auf Leistungselektronik in Energiespeichern und –systemen umfasst einerseits die Systemtechnik und Regelung (sowohl zum Energiespeichersystem als auch zum Netz hin) sowie andererseits die Kosten, Zuverlässigkeit und den Wirkungsgrad der Umrichter.

Zu den letztgenannten Aspekten tragen die oben genannten Technologiefelder der Leistungshalbleiter, ihrer Ansteuerung, der Schaltungstopologien und ihrer Steuerung bei. Unter den Schaltungstopologien sind besonders die modularen Multilevel-Umrichter hervorzuheben, die erst seit relativ kurzer Zeit bekannt sind und schon die Technologie von HGÜ-Anlagen revolutioniert haben. Das IAL kann hier Erfahrungen zur Anbindung von Batteriespeichern ans Netz sowie zu neuen Schaltungstopologien einbringen, die sich insbesondere für Windenergieanlagen zu eignen scheinen. Auch hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

Jede Anwendung macht auch eine Optimierung der Leistungselektronik für diesen Anwendungsfall erforderlich. Das bloße Zusammenschalten von Komponenten führt zu einer Überdimensionierung und damit zu unnötigen Kosten und Verlusten. Daher besteht auch weiterhin Forschungsbedarf zur Bewertung leistungselektronischer Lösungskonzepte für die einzelnen Anwendungen.

Der Einsatz von Leistungselektronik in der Energietechnik muss höchste Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen. Hier sind ebenfalls die modularen Topologien von Interesse, weil sie redundante Auslegungen und damit eine Erhöhung der Zuverlässigkeit erlauben. Andererseits besteht Forschungsbedarf zu Ausfallmechanismen und insbesondere zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Einsatzparametern und Ausfällen von Leistungshalbleitern. Hierzu sind thermomechanische Alterungsprozesse aufgrund von Lastwechseln von Bedeutung, diese sind aber nur für einen Teil der beobachteten Ausfälle verantwortlich. Eine Verbesserung der Vorhersage der Alterung, das Condition Monitoring der Leistungselektronik sowie die Klärung und Modellierung weiterer Ausfallmechanismen stehen hier im Vordergrund des Forschungsinteresses.

12.4 Innovations- und Technologiepotenzial

Im Hinblick auf konkrete Ansätze zum Forschungstransfer in die Wirtschaft sind niedersächsische Unternehmen wie Lenze (Leistungselektronik für Antriebe und Netzzurückspeisung), Continental (LE für die Fahrzeugtechnik) Sieb&Meyer (LE für Spezialantriebe sowie für dezentrale Energieanwendungen) zu nennen. Sie entwickeln und fertigen leistungselektronische Geräte für verschiedene Anwendungen, wobei jeweils nur die Schwerpunkte angeführt sind.

12.5 Forschungstransfer

In der Anwendung von Leistungselektronik sind einerseits die Energieversorger (E.On, EWE usw.) und andererseits die Hersteller von Systemen und Anlagen zu

nennen. Dazu gehören VW (LE für Fahrzeugantriebe), Enercon (Windenergieanlagen) usw.

Damit bestehen einerseits Chancen für etablierte Hersteller leistungselektronischer Geräte, auch spezialisierte Geräte für regenerative Energien, Speicher oder Netze zu entwickeln und anzubieten. Andererseits bestehen Möglichkeiten für etablierte Hersteller von Anlagen und Systemen, sich in die genannten Richtungen zu erweitern und dazu ihr System- und Anwendungswissen um die Speicher- und Netztechnologien zu erweitern. Schließlich bestehen beste Möglichkeiten für die Gründung von Unternehmen, da der Markt stark wächst und gerade in Niedersachsen bislang zu wenige spezialisierte Anbieter und Hersteller mit leistungselektronischer Expertise existieren.

13 Energiewirtschaft

13.1 Einleitung

Die „Energiewende“ erfordert techno-ökonomische, technologieneutrale Analysen, die neben den technischen Aspekten auch ökonomische Aspekte wie Einbindung niedersächsischer KMU, niedersächsische Arbeitsplätze und Steuereinnahmen, die „niedersächsische Handelsbilanz“, niedersächsische Fördermaßnahmen, die Wirtschaftlichkeit niedersächsischer Speicher (zentral, dezentral) vs. niedersächsischer Energietransporte (Strom, andere Energieträger) und niedersächsische Klima- und Umweltziele, u. a. CO₂-Bilanzen und allg. Ökobilanzen mit einbezieht. In einer derartigen techno-ökonomischen Analyse muss die Finanzierung der Energiespeicher und -transportsysteme ausführlich diskutiert werden, z. B. privat, öffentlich, PPP (public private partnership), staatlich subventioniert oder konsortial mit anschließender Syndizierung. Neben der Kapitalbeschaffung sind umfassende Risikomanagement- und Cash-Flow-Analysen nötig, z. B. muss auch für einen „Stand by“ von EE-Stromerzeugungsanlagen und deren seltene Nutzung ein ausreichender Cash-Flow generiert werden.

Generell sollte immer techno-ökonomisch abgewogen werden, ob überschüssige erneuerbare Energie

- transportiert (Transportkosten und Transportverluste) oder
- gespeichert (Speicherkosten und Speicherwirkungsgrade, ggf. auch bei mehrfacher oder Rück-Transformation des Energieträgers)

wird oder beides sinnvoll ist. Dezentrale Speicher, z. B. Elektrofahrzeuge, Kälte-/Wärmespeicher oder Batterien, werden zukünftig stärker in den Fokus der Betrachtung rücken, da sie Energietransporte vermeiden helfen und eine Finanzierung durch Privathaushalte erleichtern („Demokratisierung des Energiesystems“ und finanzielle und organisatorische Entlastung des Staates und großer Energieversorger). „Prosumern“ (Privathaushalte, Unternehmen, Organisationen), die durch Anreize und/oder vertraglich steuerbar sind, kommt dabei in der Zukunft eine bedeutende Rolle zu. Datenschutzaspekte und Akzeptanzaspekte für Privatpersonen und Unternehmen sind dabei wichtig: nicht alle Daten/Informationen, die technisch messbar sind, lassen sich in der Praxis auch tatsächlich erheben. Besser ist oft auf unidirektionale Anreizsysteme für ein gewolltes Verhalten zu setzen, d. h. z. B. zeit- und ortsabhängige Preissignale für Stromverbrauch und -erzeugung zu senden, bis hin zur mittel- und langfristigen Umsiedlung von stromintensiven Unternehmen oder auch der tageweisen Schichtplanung für Personal in diesen Unternehmen. Die Prognosen und Prognoseverfahren für EE-Stromerzeugung und -Stromverbrauch sind auf Sicht von 24 bis 48 Stunden und auch bezogen auf den Ort der Erzeugung inzwischen sehr gut und genau geworden.

Problematisch ist aufgrund verbesserter Prognosen generell weniger die Unsicherheit, sondern vielmehr die Volatilität der EE-Erzeugung – mit Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit – und die hohen Verluste bei der Umwandlung der

Energieträger zur Speicherung und Rücktransformation oder zur Nutzung „überschüssiger“ Energie für Verkehr oder Gebäudeklima. Bei der Speicherung (überschüssiger) erneuerbarer Energie muss zukünftig auch stärker betrachtet werden, welche Möglichkeiten sich durch die sinnvolle Produktion von Kraft- und Brennstoffen ergeben. Hohe Verluste bei der Umwandlung der Energieträger führen dabei jedoch zu geringer Energieeffizienz und geringer Wirtschaftlichkeit. Mathematisch modellbasiert und theoriegeleitet müssen Ursache-Wirkungszusammenhänge generell besser analysiert und verstanden werden, so dass eine nachvollziehbare, transparente Entscheidungsunterstützung für die Akteure des Energiesystems möglich wird.

Eine ganzheitliche Optimierung des Energiesystems (Gebäude, Verkehr, Strom) wird mathematisch durch ein multikriterielles, gemischt-ganzzahliges, komplexes Optimierungsproblem mit vielfältigen Beschränkungen modelliert.

Neben dieser mathematischen Optimierung ist das Thema Energiespeicher auch aus der ganzheitlichen ökonomischen Perspektive zu betrachten. Nur wenn Speichersysteme oder Kombinationen von Systemen wirtschaftlich zu betreiben sind, werden sie sich im Markt etablieren.

13.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Im Forschungsschwerpunkt „Erneuerbare Energien und neue Mobilität“ des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Leibniz Universität Hannover (LUH-IWI) werden die Themenbereiche Lastbalancierung durch Preissignale für Stromversorger sowie Finanzierung, Risikomanagement, Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von EE-Anlagen bearbeitet. Dabei sind technische, betriebswirtschaftliche, volkswirtschaftliche und gesellschaftliche Fragestellungen oft nicht voneinander zu trennen und müssen integriert betrachtet werden.

Im Rahmen des EFZN- Projektes „Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke“ wurden an der Technischen Universität Clausthal am Institut für Wirtschaftswissenschaften wirtschaftliche und soziale Kriterien für Speicherverfahren beispielhaft für Pumpspeicherkraftwerke identifiziert und untersucht. Untersucht werden untertägige Pumpspeicherwerke (PSWuT) in stillgelegten Bergwerken unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Nach Vorstellung möglicher Flexibilisierungsoptionen (z. B. Lastmanagement, Netzausbau, E-Mobility usw.) werden in einem Kostenvergleich potenzielle Speichertechnologien dargestellt und Einflussfaktoren auf die Kosten identifiziert. Akzeptanzaspekte waren wesentlicher Bestandteil der Untersuchung.

An der Georg-August Universität Göttingen wurde an der Professur für Produktion und Logistik die multikriterielle Bewertung verschiedener energetischer Verfahren bezüglich der Nachhaltigkeitsdimensionen sowohl in ihrer Gesamtheit als auch in den einzelnen Dimensionen untersucht. Ökologische Komponenten sind in Ökobilanz-Untersuchungen beforscht worden, während die Analyse der gesellschaftlichen Auswirkungen der Energiewende Forschungsobjekt der Soziologie war. Betriebswirtschaftliche Optimierungsmodelle wurden beispielsweise für

Standort- und Produktentscheidungen bei der stofflichen Speicherung unter Verwendung von Fischer-Tropsch-Synthese und Methanisierung eingesetzt.

13.3 Forschungsbedarf

Die Bewertung von Speicherverfahren erfordert eine technologieneutrale, technoökonomische Analyse, die simultan entscheidungsrelevante Größen wie vorhandene Kapazitätspotenziale, Flexibilität bei Ladung und Entladung des Speichers, den Wert ggf. hergestellter Zwischenprodukte und die notwendigen Investitionen berücksichtigt.

Da sich die verschiedenen Speicher in wichtigen technischen und wirtschaftlichen Kenngrößen signifikant unterscheiden, ergeben sich je nach Geschäftsmodell unterschiedliche Optimierungspotenziale. Durch die Kombination von Speichern untereinander, sowie mit anderen Verfahren können die Schwächen einzelner Speicherverfahren z. B. durch die wirtschaftliche Nutzung von Nebenprodukten wie Wärme, durch die Erschließung von Größendegressionseffekten bei gemeinsamer Nutzung von Teilanlagen oder durch eine erhöhte Auslastung von Anlagenteilen zum Teil ausgeglichen werden. Dabei steht im Mittelpunkt das Zusammenspiel von unterschiedlichen Speichertechnologien, welche sich in möglichen Geschäftsmodellen evaluieren lassen. Darüber hinaus steht im Zentrum zukünftiger Forschungsarbeiten im Bereich Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern und -systemen neben der Identifizierung und Untersuchung geeigneter ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Entscheidungskriterien vor allem die Entwicklung von Methoden zur Auswahl von Speicheralternativen. Folgende Projekte können vorgeschlagen werden:

- Entwicklung eines Meta-Geschäftsmodellkonzeptes von Energiespeichersystemen, durch dessen Einsatz unterschiedliche Speichertechnologiekombinationen einer ökonomischen Evaluierung unterzogen werden können.
- Techno-ökonomische, technologieneutrale Gesamtanalysen von Energiespeicher und Energietransportalternativen, u. a. auch von erneuerbaren Brenn- und Kraftstoffen Modellierung von Ursache-Wirkungszusammenhängen von staatlichen und nichtstaatlichen Anreiz-, Belastungs- und Steuerungssystemen inkl. Rechtsfragen.
- Quantitative Analysen der alternativen Verwendung überschüssiger EE-Stromerzeugung, u. a. auch Eigenverbrauch und -speicherung und „Prosumer“.
- Finanzierungs- und Risikomanagementmodelle für EE-Stromerzeuger und EEStromerzeugungsanlagen.
- Techno-ökonomische, technologieneutrale Gesamtanalysen alternativer EE-Erzeugung, z. B. Strom- durch Wind und Sonne, Biomasse, Erdwärme usw.
- Mathematische Modellierung von Energieverbrauchern und -erzeugern durch Datenanalysen, Befragungen usw.
- Modellierung multikriterieller, gemischt-ganzzahliger, komplexer Optimierungsproblem mit vielfältigen Beschränkungen in verschiedenen Detailgraden sowie deren numerische/algorithmische Lösung zur Beschreibung alternativer „Energiewendeszenarien“.

- (Mechanische) SpeicherPotenzialanalyse für Niedersachsen.
- Anreizsysteme zur Sicherung der Systemstabilität.

13.4 Innovations- und Technologiepotenzial

Für die niedersächsische und norddeutsche Wirtschaft ergeben sich Innovations- und Technologiepotenziale vor allem bzgl. Softwareentwicklungen, insb. mit Künstlichen Neuronalen Netzen, und Entscheidungsunterstützungssystemen. Weitere Untersuchungen werden auf Basis von Wirtschaftlichkeits-, Ökobilanz- und Szenarioanalysetools, komplexer Simulationsumgebungen und Optimierungsalgorithmen durchgeführt.

13.5 Forschungstransfer

Konkrete Projekte mit Forschungstransfer in marktreife Produkte und Dienstleistungen werden am IWI der LUH derzeit mit der PSI Energy Markets, Hannover, und Quicar/Volkswagen FS, Hannover, durchgeführt. Gute informelle Kontakte bestehen zur NORD/LB, Hannover, zur Stadt Hannover und zur Metropolregion.

Der Forschungstransfer bzgl. untertägiger Pumpspeicherkraftwerke erfolgt durch ansässige Industrieunternehmen wie z. B. Harz Energie GmbH & Co KG und Volkswagen Kraftwerk GmbH.

14 Energierecht

14.1 Einleitung

Anders als bei Gasspeichern, für die bereits ein relativ ausdifferenzierter Rechtsrahmen entstanden ist, bestehen für Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie sowohl nach dem europäischen als auch dem deutschen Recht lediglich punktuelle Vorgaben.

So sind Stromspeicher im deutschen EnWG bereits in Bezug auf den Netzanschlussanspruch und als Adressaten im Interesse der Systemverantwortung berücksichtigt worden (vgl. § 17 Abs. 1, § 13 Abs. 1a EnWG). Es existieren außerdem Regelungen, die der Förderung von weiterem Zubau von Stromspeichern dienen sollen. Hierbei handelt es sich insbesondere um Vorgaben im Hinblick auf die Befreiung von (ggf. nur einigen) Anlagen zur Speicherung von elektrischer Energie von den Netzentgelten, vgl. § 118 Abs. 6 EnWG, von der EEG-Umlage, vgl. § 37 Abs. 4 EEG, und von der Stromsteuer, vgl. § 9 StromStG i.V.m. § 12 Abs. 1 StromStV. Hierbei gelten teilweise Sonderregeln für Pump- im Gegensatz zu anderen Speichertypen. Schließlich wurde mit der Änderung des EEG im Jahr 2009 die Möglichkeit der EE-Vergütung auch für EE-Speicherstrom geschaffen, vgl. §§ 3 Nr. 1, 16 EEG.

Spezialregelungen für den Anschluss an und Zugang zu Stromspeichern bestehen bislang ebenso wenig wie Spezialregelungen für die Entflechtung des Betriebs von Stromspeichern von anderen Tätigkeiten im Energiebereich.

14.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

In dem am EFZN bearbeiteten interdisziplinären Projekt „Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke“ im Auftrag des BMU wurden rechtliche Fragen von Speichertechnologien, insbesondere im Hinblick auf die Pumpspeichertechnologie untersucht. Vor allem planungs- und genehmigungsrechtliche, sowie umweltrechtliche Fragen (z. B. Wasserrecht, Naturschutzrecht), aber auch Fragen des Bergrechts wurden bei der Untersuchung der Möglichkeiten einer konkreten Umsetzung von untertägigen Pumpspeicherwerken in stillgelegten Bergwerken relevant.

Im Rahmen der vom Forschungsbereich Recht des EFZN mitbearbeiteten und im Mai 2013 erschienenen BMWi-Studie „Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit“ wurden vor allem Rechtsfragen der Regulierungsanforderungen für Stromspeicher untersucht. Gegenstand der Untersuchung waren dabei insbesondere die jeweils nach Art der Speichertechnologie, Nutzungszweck des Speichers, Entflechtungsform und Person des Speicherbetreibers zu differenzierenden Entflechtungsvorgaben. Daneben wurde auch die Funktionsweise der einzelnen Fördermechanismen für Stromspeicher als Grundlage einer ökonomischen Analyse und Anpassungsmöglichkeiten für das Speichertechnologien betreffende Marktdesign relevant.

Im Rahmen der EFZN-Tagung zu unkonventionellen Pumpspeichern wurden die regulierungsrechtlichen Anforderungen an den Betrieb von Stromspeichern dargestellt.

14.3 Forschungsbedarf

Im Hinblick auf den bislang nur wenig ausdifferenzierten Rechtsrahmen und die aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht zunehmende Bedeutung der Stromspeicherung besteht derzeit erheblicher Forschungsbedarf.

Soweit bislang keine gesetzlichen Vorgaben für Stromspeicher bestehen, ist zu klären, ob Stromspeicher nach dem geltenden Rechtsregime zureichend eingeordnet und geregelt werden können, etwa in Bezug auf Regulierungsfragen.

Sofern bereits besondere gesetzliche Vorgaben für Stromspeicher bestehen, z. B. im Hinblick auf die verschiedenen Fördermechanismen, ist bislang noch nicht abschließend rechtswissenschaftlich untersucht worden, inwieweit diese Regelungen tatsächlich die Möglichkeit bieten, die gesetzgeberischen Ziele zu erreichen oder ob diese mit gesetzgeberischen Zielen in anderen Rechtsbereichen ggf. in Konflikt stehen. Gerade die genannten Fördermechanismen werfen weitere bislang ungeklärte Rechtsfragen auf, wie z. B. die Konformität mit dem Gleichbehandlungsgrundsatz oder europarechtlichen Vorgaben des Beihilfen- und Binnenmarktrechts.

Offen und bislang praktisch ungeregelt ist das Zusammenspiel von Anlagen zur Speicherung von elektrischer Energie mit anderen Mechanismen und Technologien im derzeit in Deutschland herrschenden energiewirtschaftlichen System, dass sich zudem aktuell in einer Umbruchphase befindet. In rechtswissenschaftlicher Hinsicht besteht hier erheblicher Forschungsbedarf z. B. zu der Frage des (aus technischer Sicht notwendig werdenden) Einsatzes von Speichern im Rahmen der Bereitstellung von Systemdienstleistungen, des Zugriffs z. B. von Netzbetreibern auf Speicherkapazitäten und der Frage der Steuerung einer Ansiedlung von Speichern an bestimmten Lokalitäten. Offen sind außerdem viele Fragen der grenzüberschreitenden Speichernutzung.

Ebenfalls ungeklärt ist die Frage, wie zukünftig in rechtlicher Hinsicht mit der Vielzahl der bereits marktreifen und in der Entwicklung befindlichen Speichertechnologien umzugehen sein wird, konkret, ob und welche Differenzierungen aus Rechtsgründen hier notwendig werden können. Besonders augenfällig ist dies in Bezug auf die Power-to-Gas(-to-Power)-Technologie, die eine Schnittmenge zwischen der bereits vom Gesetzgeber stärker geregelten Gasspeicherung und der in wesentlichen Bereichen noch ungeregelten Stromspeicherung bildet.

14.4 Innovations- und Technologiepotenzial

Aus den vorgenannten zahlreichen Projekten und im Bereich Stromspeicherung aktiven Unternehmen ergeben sich auch Innovations- und Synergiepotenziale für die rechtswissenschaftliche Forschung im Bereich der Stromspeichertechnologien. Gerade das EFZN bietet die Möglichkeit der engen und dauerhaften Kommunikation und Zusammenarbeit z. B. in fachübergreifenden Projekten von

Rechtswissenschaftlern mit Forschern der anderen in diesem Papier genannten Fachrichtungen.

14.5 Forschungstransfer

Im Zentrum der rechtswissenschaftlichen Forschung steht regelmäßig, konkreten Anpassungsbedarf des geltenden Rechtsrahmens zu ermitteln und dem Bundes- oder Landesgesetzgeber aufzuzeigen, sowie begründete Lösungsvorschläge anzubieten, wie dies z. B. im Rahmen der BMWi-Studie erfolgt ist.

15 Sozialwissenschaftliche Energieforschung

15.1 Einleitung

Kaum ein Begriff ist heute so präsent in unserer Gesellschaft wie der Begriff der „Energiewende“. Dieser wird verstanden als ein an Nachhaltigkeitsprinzipien orientierter sozio-technischer Umbau der Energiesysteme: von den bisher dominierenden fossilen und nuklearen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien und einer stärkeren Dezentralisierung der Energieerzeugung. Eine so verstandene Energiewende wird unter dem Einfluss des globalen Klimawandels, dem Wissen um die Endlichkeit der fossilen Ressourcen sowie unter dem Eindruck katastrophaler Unglücksfälle in Kernkraftwerken (Tschernobyl, Fukushima) von der Mehrzahl der Bevölkerung begrüßt und für notwendig erachtet. Dies wird nicht zuletzt deutlich an den seit Jahren überaus positiven Umfragewerten, die die erneuerbaren Energien im Vergleich zu fossilen und nuklearen Energieträgern erzielen. Typisch für die deutsche Entwicklung ist zudem, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien von einem breiten Spektrum „neuer“ Akteure im Energiesektor getragen wird: Hiermit ist nicht nur die seit den 1980er Jahren neu entstandene mittelständische Branche der Hersteller, Planer und Betreiber erneuerbarer Energietechnologien gemeint. Hinzu kommt gerade in Niedersachsen eine große Zahl von Landwirten, die Biogasanlagen, mittelgroße PV-Anlagen sowie eigene Windkraftanlagen betreiben. Und schließlich profitiert die Energiewende davon, dass sie sich auf eine breite Basis zivilgesellschaftlicher Erzeuger von Regenerativstrom stützen kann: Neben den zahllosen Haushalten mit eigener Solaranlagen auf dem Dach trifft man hier auf eine Vielzahl von aus der Bürgerschaft heraus gegründete Initiativen (Bürgerwindparks; Solarvereine; regionale 100 %-Erneuerbare-Initiativen usw.) und seit einigen Jahren zudem verstärkt auf Neugründungen von Energiegenossenschaften. Dies alles macht deutlich, dass es bei der Energiewende nicht allein um eine technologische Transformation geht – gleichwohl eine solche als unabdingbare Voraussetzung des angestrebten Energiewandels betrachtet werden muss. Die Energiewende muss vielmehr als gesamtgesellschaftliche Aufgabe gesehen werden, die nicht nur einen institutionellen Wandel auf nationaler wie internationaler Ebene (etwa im Hinblick auf Technologieförderung, Marktregulierung, Raumplanung, Netzregulierung, CO₂-Besteuerung, Verkehrsplanung usw.) erfordert, sondern neben den „neuen“ wie „alten“ Akteuren der Energiewirtschaft auch die Bürgerinnen und Bürger mit einbezieht. Dabei dürfe es, so der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), nicht nur um oberflächliche Akzeptanzbeschaffung gehen. Vielmehr müsse die „Bürgergesellschaft“ als „Mitgestalterin für das Gelingen des Transformationsprozesses anerkannt“ werden: „Die Idee des gestaltenden Staates ist also untrennbar verbunden mit der Anerkennung der Zivilgesellschaft und der innovativen Kräfte in Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung“.⁴ Eine auf die genannten Akteure ausgerichtete politische Förderung der Energiewende steht allerdings vor dem Dilemma, dass

4 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Berlin 2011, S. 8f.

nicht nur Planungen und neue Bauvorhaben im Bereich der konventionellen Stromwirtschaft, sondern auch der zunehmende Ausbau der erneuerbaren Energien sowie der dafür notwendigen Netzinfrasturktur bei einem Teil der betroffenen Bürgerinnen und Bürger sowie bei lokalen Umwelt- und Naturschützern auf Skepsis oder Ablehnung stößt. Die „Bürgergesellschaft“ meldet sich auch hier zum Teil lautstark zu Worte. Mit der Verbreitung der erneuerbaren Energien wurden diese selbst vom gesellschaftlichen Risikodiskurs „eingeholt“. Damit ist die Frage der Sozialverträglichkeit der Energiewende auf die politische Agenda gerückt. Hier ist ein neues Konfliktfeld entstanden, das ganz unterschiedliche Facetten aufweist. Unterscheiden sollte man auf jeden Fall:

- Konflikte, bei denen es um Fragen des regionalen Landschafts- und/oder Naturschutzes geht und in die zum Teil kulturell tief verankerte landschaftsästhetische Vorstellungen und Bindungen eingehen.
- Ökonomisch motivierte Nutzungskonflikte (etwa zwischen regional ansässigem Tourismusgewerbe und Investoren in erneuerbare Energien).
- Konflikte um befürchtete oder bereits wahrgenommene Beeinträchtigungen der Lebensqualität der lokalen Bevölkerung: etwa durch Lärmbelästigungen, visuelle Beeinträchtigungen oder (vermutete) Gesundheitsgefährdungen. Wie bisherige Konflikte um Geothermieprojekte oder die öffentliche Debatte über das „Fracking“ zeigen, besteht vielerorts eine besonders ausgeprägte Sensibilität gegenüber vermuteten Gefahren, die aus dem „Untergrund“ kommen. Keineswegs auszuschließen ist somit, dass auch Planungen bzw. konkrete Vorhaben im Bereich unterirdischer Energiespeicher in den Fokus eines solchen Gefahrenbewusstseins geraten könnten.
- Sofern wahrgenommene Einbußen der Lebensqualität mit der Befürchtung einhergehen, dass in der Nähe regenerativer Energieanlagen, großvolumiger (unterirdischer) Speichertechnologien oder neuer Stromtrassen Wertverluste von Immobilien drohen, können die Konflikte zusätzliche Sprengkraft erhalten.

Bisherige Erfahrungen zeigen, dass frühzeitige und umfassende Informationen und angemessene Partizipationsmöglichkeiten betroffener Bürgerinnen und Bürger an einschlägigen Planungs- und Umsetzungsprozessen (etwa in Form von Runden Tischen, Nachbarschaftsforen, Bürgerentscheiden sowie finanziellen Beteiligungsmöglichkeiten) sowie die Schaffung entsprechender institutioneller Strukturen und Instrumente zur Konfliktentschärfung beitragen können. Auch wenn nicht jeder auftretende Interessenkonflikt auf diese Weise aus der Welt geschaffen würde und Projektplanungen mit zusätzlichen Kosten oder Zeitschleifen (etwa im Fall langwieriger Mediationsverfahren) belastet werden könnten, so wird die Gewähr für sozial nachhaltige Formen der Energiewende damit voraussichtlich steigen.

In der Förderlogik für erneuerbare Energien steckt ein weiteres Dilemma, das die Sozialverträglichkeit der Energiewende beeinträchtigen könnte, insofern die bürgernahe Verbreitung dezentraler Ökostromanlagen von einer sozialen Schieflage gekennzeichnet ist. So gehören die Mitglieder von „Bürgerkraftwerken“ und Energiegenossenschaften oder die Besitzer von Solaranlagen auf dem eigenen Hausdach bisher überwiegend zur gesellschaftlichen Mittelschicht, die hier sich

bietenden Möglichkeiten zu „ethischen“ Geldanlagen nutzt (und aufgrund ihrer Einkommenssituation auch nutzen kann). Einkommensschwächeren Haushalten stehen diese Möglichkeiten deutlich weniger offen. Zudem sind sie durch die – nicht zuletzt von der gesetzlichen Ökostromförderung verursachten – Energiepreissteigerungen der vergangenen Jahre am stärksten benachteiligt, was die Zustimmung zur Energiewende auf längere Sicht untergraben könnte. Um dieser sozialen Schieflage entgegenzuarbeiten, müsste es zu einem gerechten Lastenausgleich zwischen besserverdienenden und einkommensschwachen Bevölkerungsgruppen kommen – dies könnte z. B. durch Sondertarife beim Strombezug oder die (finanzielle und/oder praktische) Unterstützung bei energiesparenden bzw. effizienzsteigernden Maßnahmen in einkommensschwächeren Haushalten geschehen (etwa durch Vergünstigungen bei der Anschaffung neuer energiesparender Haushaltsgeräte oder den Einsatz von intelligenten Stromzählern im Rahmen des Lastmanagements und den dadurch erzielbaren Vorteilen beim Strompreis).

15.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Seit Mitte der 1980er Jahre werden am Soziologischen Forschungsinstitut Göttingen (SOFI) an der Georg-August-Universität im Rahmen des Forschungsschwerpunkts „Wandel von Produktions- und Innovationsmodellen“ Untersuchungen zum Thema Gesellschaft und Ökologie durchgeführt, seit Mitte der 1990er Jahre mit explizitem Bezug zum Energiethema:

- Eine 1997 abgeschlossene und gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Stadtforschung der Universität Oldenburg durchgeführte empirische Studie zum Verhältnis von Ökologie und urbaner Lebensweise am Beispiel ökologischer Wohnprojekte in Deutschland, Österreich und Dänemark (gefördert aus Mitteln des Vorab der Volkswagenstiftung).
- Eine 2001 abgeschlossene empirische Untersuchung zum Mobilitätsverhalten im Alltag und den Motiven der Verkehrsmittelwahl im Kontext junger Familien (gefördert aus Mitteln des Vorab der Volkswagenstiftung).
- Ein 2002 abgeschlossenes empirisches Forschungsprojekt zum innovativen Potenzial bürgerschaftlichen Engagements in selbstorganisierten Umweltprojekten am Beispiel der Windenergienutzung, des Car Sharing und des autofreien Wohnens (gefördert aus Mitteln der DFG).
- Eine 2005 abgeschlossene empirische Untersuchung zu Akzeptanzproblemen und Konflikten um die geplante Offshore-Windkraftnutzung in der deutschen Nord- und Ostsee (gefördert aus Mitteln des Vorab der Volkswagenstiftung).
- Ein 2008 abgeschlossenes empirisches Forschungsprojekt zu den gesellschaftlichen Triebkräften und Hemmnissen bei der Entwicklung und dem Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland (gefördert aus Mitteln der DFG).
- Ein 2012 abgeschlossenes technik- und innovationssoziologisches Forschungsprojekt zum Thema „Expansion regenerativer Stromerzeugung als Motor systembezogener Innovationen im deutschen Elektrizitätssektor“ (gefördert aus Mitteln der DFG).

- Ein laufendes, in Kooperation mit dem Institut für Systemwissenschaften, Innovations- und Nachhaltigkeitsforschung der Universität Graz bearbeitetes empirisches Projekt, das im Rahmen eines österreichisch-deutschen Vergleichs die Rolle von Bottom-up-Initiativen beim Ausbau erneuerbarer Energien untersucht (RESHAPE) (gefördert aus Mitteln des Österreichischen Klima- und Energiefonds).

15.3 Forschungsbedarf

Aktueller Forschungsbedarf besteht aus sozialwissenschaftlicher Sicht insbesondere zu folgenden Themenbereichen:

- Der Privathaushalt als Mitspieler des energiesystemischen Wandels:

Privathaushalte sind nicht nur zu Energieproduzenten geworden (insbesondere durch die dezentrale Verbreitung von Photovoltaik- und solarthermischen Anlagen), sondern sie gehören auch zu den potentiellen Nutzern intelligenter Energietechnik im Haus bzw. in der Wohnung (z. B. durch die Nutzung energiesparender oder effizienzsteigernder Techniken, durch Nutzung von „smart metering“ oder „smart-home“-Techniken usw.). Hier wäre es wichtig zu wissen, welche sozialstrukturellen Merkmale für Haushalte typisch sind, die sich vom passiven Stromkunden zum aktiven Energiedienstleister (bzw. zum „Energie-Prosumer“) gewandelt haben. Welche Handlungsanreize sind relevant, welche Handlungsmotive sind ausschlaggebend, welche Formen der Einbindung in lebensstilgebundene Praktiken liegen vor, welche typischen Nutzerprofile zeichnen sich ab? In diesem Zusammenhang ist auch die Frage interessant, inwieweit die Nutzung intelligenter Haustechnik und dezentraler Stromproduktion auch als Mittel sozialer Distinktion und milieuspezifischer Identifikation dient: Fungiert Technik hier als Mittel sozialer Teilhabe wie auch sozialer Abgrenzung? Und unter welchen infrastrukturellen, institutionellen und personellen Voraussetzungen kann es gelingen, den Wandel der Energienutzung im Haushalt in breitere Bevölkerungsschichten (z. B. auch in einkommensschwächere Haushalte) hineinzutragen? Neben dem Thema der dezentralen Haustechnik (wozu perspektivisch auch dezentrale Speichertechniken gehören) können die skizzierten Fragen auch auf das Thema „Elektromobilität“ angewendet werden: Da die Einführung von Elektromobilität mittel- bis langfristig auf den Massenmarkt der Autokäufer abzielt (und nicht auf eine Nischenmarktstrategie beschränkt bleiben soll), werden sich letztlich nur solche neuen Mobilitätsleitbilder (und Fahrzeugkonzepte) durchsetzen können, die vom Gros der Autofahrerinnen und Autofahrer akzeptiert werden und mit ihren Mobilitätsbedürfnissen in Einklang gebracht werden können. Ohne das Mitspielen der Nutzer ist weder der massenhafte Umstieg auf das Elektroauto noch die massenhafte Integration von Elektroautos als flexible Zwischenspeicher in das Energienetz zu erwarten. Die Frage ist somit, unter welchen infrastrukturellen, institutionellen und fahrzeugtechnischen Bedingungen ein entsprechender Verhaltenswandel im Bereich der Autonutzung gefördert werden könnte.

- Der Beitrag bürgerschaftlicher Akteure zur energietechnischen Systemintegration:

Wie oben bereits ausgeführt, ist für die deutsche Energiewende kennzeichnend, dass in der Bürgerschaft eine breite Motivation besteht, sich am dezentralen Ausbau der erneuerbaren Energien zu beteiligen. Die Frage ist, inwieweit sich diese Motivation nicht nur auf die Inanspruchnahme des gesetzlich garantierten Einspeisevorrangs für Ökostrom beschränkt, sondern sich perspektivisch auch auf eine stärker systemintegrative Rolle der bürgerschaftlichen Energieerzeuger erstrecken könnte, etwa durch den Einstieg in Direktvermarktungs-Modelle für Ökostrom, die Übernahme des lokalen/regionalen Netzbetriebs oder den Betrieb von lokalen KWK-Techniken, Nahwärmenetzen oder dezentralen Speichertechnologien. Zu untersuchen wäre zum einen, inwieweit sich hier neue Geschäftsmodelle für eine breitere bürgerschaftliche Beteiligung entwickeln könnten und auf welchen (ehrenamtlichen oder semi-professionellen) Organisationsformen diese Geschäftsmodelle beruhen könnten, zum anderen wäre zu fragen, inwieweit sich hier neue Kooperationsformen zwischen bürgerschaftlichen Initiativen und professionellen Unternehmen der Energiebranche – aus dem neuen „grünen Mittelstand“, aus dem Bereich kommunaler Energieversorger oder auch der traditionellen Strombranche – herausbilden könnten, womit sich die Anwendung innovativen technologischen Know-hows und die Partizipation (von Teilen) der Bürgerschaft miteinander verbinden ließen. Zu untersuchen wäre überdies, worauf die spezifische Leistungsfähigkeit solcher die Bürgerschaft einbeziehender Kooperationsformen beruhen könnte, etwa im Hinblick auf die Fähigkeit, soziales Kapital im lokalen/regionalen Raum für die Ziele der Energiewende zu mobilisieren sowie dezentrale Netzwerke der Technikdiffusion im Bereich innovativer Energietechniken aufzubauen und zu stabilisieren, oder im Hinblick darauf, moderierend auf mögliche Nutzungs- oder Zielkonflikte bei der Planung bzw. Implementation regenerativer Energietechniken einzuwirken.

- Energiewende als Chance regionalen Strukturwandels:

Die Expansion der Erneuerbare-Energien-Branche hat seit den 1990er Jahren einige lokale bzw. regionale Strukturwandelprozesse in Gang gesetzt, überdies mancherorts Erwartungen in substantielle regionale Strukturverbesserungen geweckt. Dass solche Erwartungen durchaus berechtigt sind, zeigen Studien, die auf positive kommunale Wertschöpfungseffekte durch die Ansiedlung von Firmen aus dem Bereich Erneuerbarer-Energien-Technologien hinweisen (infolge zusätzlicher kommunaler Steuereinnahmen, Unternehmensgewinne und der Nettoeinkommen der in diesen Firmen beschäftigten Arbeitnehmer). Zu fragen wäre, inwieweit sich infolge des kontinuierlichen Ausbaus dezentraler erneuerbarer Energien sowie der zunehmend notwendig werdenden Techniken der Systemintegration (z. B. Energiespeicher; dezentrales Energiemanagement; Kraft-Wärme-Kopplung; virtuelle Kraftwerke) neue Chancen für regionalökonomischen Strukturwandel unter verstärktem Einbezug bürgerschaftlicher Akteure (siehe oben) und Arbeitskräfte abzeichnen. Mehr noch: Unter welchen Bedingungen kann es hier zu neuen regionalwirtschaftlich relevanten Clusterbildungen und zur Herausbildung regionaler Innovationsnetzwerke und -profile kommen? Aus sozialwissenschaftlicher Sicht ist hier von besonderem Interesse, inwieweit solche Entwicklungen von der Einbettung in fördernde lokale bzw. regionale Governancestrukturen abhängen, das heißt von spezifischen Akteurskonstellationen, Entscheidungsprozessen und

Regelungsstrukturen im Zusammenspiel von Kommunalpolitik, kommunalen Energieversorgern, lokaler bzw. regionaler Wirtschaft und bürgerschaftlichen Initiativen und Organisationen. Zu untersuchen wären die sozialen Möglichkeitsräume und Potenziale, die der Gestaltung zukunftsfähiger und verlässlicher Strukturen des lokalen/regionalen Energiewandels zugrunde liegen, wobei sich das besondere Augenmerk sowohl auf die Handlungsmotive, Interessen, Ziele und Handlungsstrategien als auch auf die realen Möglichkeiten und Ressourcen der Einflussnahme der relevanten Akteure/Akteursgruppen richten müsste.

- Soziale Konfliktpotenziale:

Im Fokus gesellschaftlicher Auseinandersetzungen stehen nicht nur seit vielen Jahren die konventionellen Energieträger Kohle und Kernenergie, auch der Ausbau erneuerbarer Energien sowie die Errichtung neuer Stromtrassen ist mit sozialen Konfliktpotenzialen verbunden (siehe oben), die den Strukturwandel der Energieversorgung hemmen könnten. Wichtige Forschungsfragen sind in diesem Zusammenhang:

Welche gesellschaftlichen Technikbilder und -erfahrungen, Risikoeinschätzungen und Werturteile liegen solchen Konflikten zugrunde und inwieweit werden diese Wahrnehmungsweisen von in öffentlichen Diskursen erzeugten Meinungsprofilen und Relevanzstrukturen geprägt? Inwieweit liegen insbesondere gegenüber erneuerbaren Energien aus dem Untergrund (Geothermie; in unterirdischen Speichern zwischengelagerte Energieformen) spezifische soziokulturell geformte bzw. in öffentlichen Diskursen thematisierte Vorbehalte und Risikowahrnehmungen vor, die hier eine besondere Konfliktdynamik begründen könnten? Was sind dabei typische Konfliktmotive, Konflikthanlässe und -konstellationen? Welche Bohr- und Speichertechniken werden aus welchen Gründen als besonders riskant wahrgenommen bzw. treffen auf die geringste Zustimmung in der Bevölkerung? Welche Verfahren der Konfliktregulierung bzw. -lösung sind in Betracht zu ziehen? Welche Formen der Bürgerbeteiligung (siehe oben) können dazu beitragen, die Akzeptanz des energietechnischen Umbaus insgesamt zu erhöhen bzw. Konflikten entgegenzuwirken? Welche Maßnahmen sind in diesem Zusammenhang dagegen dysfunktional?

15.4 Innovations- und Technologiepotenzial

Innovationsfördernde Potenziale ergeben sich insbesondere daraus, dass die sozialwissenschaftliche Energieforschung Erkenntnisse über gesellschaftliche Bedingungen im weitesten Sinne liefern kann, die als unterstützende wie auch hemmende Faktoren innovativer Technikimplementation und Technikdiffusion im Energiebereich gelten können. Dabei können soziale Mechanismen der Verbreitung innovativer Techniken sowohl auf der makrosozialen Ebene allgemeiner Technikleitbilder, Wertvorstellungen und Risikowahrnehmungen als auch auf der mikrosozialen Ebene der technikanwendenden Haushalte, bürgerschaftlichen Initiativen sowie lokalen/regionalen Governancestrukturen und Akteurskonstellationen aufgezeigt werden.

Für die sozialwissenschaftliche Energieforschung selbst ergeben sich aus der Kooperation mit dem EFZN innovative, über die Grenzen der eigenen Disziplin hinausweisende Möglichkeiten des inter- und transdisziplinären Erkenntnisgewinns sowie der praktischen Relevanz der daraus sich ergebenden Forschungsbefunde.

15.5 Forschungstransfer

Im Rahmen der Kooperation mit dem EFZN besteht die institutionell gesicherte Möglichkeit eines interdisziplinären Transfers der Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Energieforschung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit des Forschungstrfers hin zu den sozialen Akteuren, die an der Entwicklung, Implementation, Anwendung und Verbreitung innovativer Energietechnologien sowie u. U. auch an damit verbundenen Konflikten beteiligt sind (z. B. mittels öffentlicher Ergebnispräsentationen, Workshops, Initiierung von Dialogprozessen usw.).

Anhang

Niedersächsische Forschungslandschaft Energiespeicher und –systeme



Legende

Technische Universität Clausthal (TUC)

ICVT = Institut für Chemische Verfahrenstechnik,
CUTEC = Clausthaler Umwelttechnik Institut GmbH
IEE = Institut für Elektrische Energietechnik
ite = Institut für Erdöl- und Erdgastechnik
IMVT = Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
IEPT = Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien
IBB = Institut für Bergbau
In = Institut für Informatik
ISAF = Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren
IMET = Institut für Metallurgie
IMAB = Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit
PUK = Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
WiWi = Institut für Wirtschaftswissenschaften
IBER = Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht
IGMC = Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
IEVB = Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik

Georg-August Universität (UGÖ)

PPL = Lehrstuhl für Produktion und Logistik
IZNE = Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung
SOFI = Soziologisches Forschungsinstitut an der Universität Göttingen
FESIM = Faculty of Economic Sciences Chair of Information Management
LÖR = Lehrstuhl für öffentliches Recht
GZ = Geowissenschaftliches Zentrum

Legende

Technische Universität Braunschweig (TUBS)

InES = Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik, ehemals Institut für Wärme- und Brennstofftechnik

IPAT = Institut für Partikeltechnik

IFS = Institut für Füge- und Schweißtechnik

AIP = Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion

Elenia = Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen

IMAB = Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen

NFF = Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik

BLB = Braunschweiger Laboratorium für Batterieproduktion

IÖNC = Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie

IWF = Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

IFF = Institut für Fahrzeugtechnik

IKT = Institut für Konstruktionstechnik

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (UOL)

OFFIS = Institut für Informatik

IC = Institut für Chemie

Hochschule für angewandte Wissenschaften (Ostfalia)

EOS = Institut für energieoptimierte Systeme

Labor E-Technik = Fakultät für Versorgungstechnik, Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik

Legende

Leibniz Universität Hannover (LUH)

TFD = Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik

IAL = Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik

ISAH = Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

IEE = Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik

aca = Institut für Anorganische Chemie, Arbeitsgruppe Prof. Binnewies

PCI = Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie

IM = Institut für Mineralogie

TCI = Institut für Technische Chemie

EES = Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme

**HAWK = Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst,
Hildesheim, Göttingen, Holzminden**

WWU = Westfälische Wilhelms-Universität Münster

PTB = Physikalisch-Technische Bundesanstalt